

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-141556

(43)Date of publication of application : 17.05.2002

(51)Int.Cl.

H01L 33/00

(21)Application number : 2001-321214

(71)Applicant : LUMILEDS LIGHTING US LLC

(22)Date of filing : 12.09.2001

(72)Inventor : CAMRAS MICHAEL D

KRAMES MICHAEL R

SNYDER WAYNE L

STERANKA FRANK M

TABER ROBERT C

UEBBING JOHN J

POCIUS DOUGLAS W

TROTTIER TROY A

LOWERY CHRISTOPHER H

MUELLER GERD O

MUELLER-MACH REGINA B

HOFLER GLORIA E

(30)Priority

Priority number : 2000 660317

Priority date : 12.09.2000

Priority country : US

2001 880204

12.06.2001

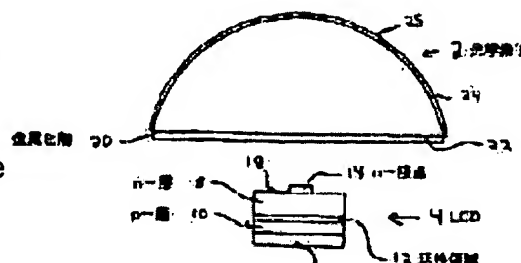
US

(54) LIGHT EMITTING DIODE WITH IMPROVED LIGHT EXTRACTION EFFICIENCY

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a light emitting device having a stack of a layer containing a semiconductor layer including an active region and improved light extraction efficiency.

SOLUTION: The light emitting device with improved light extraction efficiency is provided. The device has a stack of layers including semiconductor layers having an active region. The stack is bonded to a transparent optical



element having a refractive index for the light emitted by the active region preferably greater than about 1.5, or preferably greater than about 1.8. A method of bonding a transparent optical element (e.g. a lens or an optical concentrator) to a light emitting device comprising an active region includes a step of elevating the temperature of the optical element and the stack and a step of applying pressure to press the optical element and the light emitting device together. A block of optical element material may be bonded to the light emitting device and then shaped into an optical element. Bonding a high refractive index optical element to a light emitting device improves the light extraction efficiency of the light emitting device by reducing the loss due to total internal reflection.

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2002-141556  
(P2002-141556A)

(43)公開日 平成14年5月17日(2002.5.17)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>  
H 0 1 L 33/00

識別記号

F I  
H 0 1 L 33/00

データベース\*(参考)  
M 5 F 0 4 1

審査請求 未請求 請求項の数62 OL 外国語出願 (全 54 頁)

(21)出願番号 特願2001-321214(P2001-321214)  
(22)出願日 平成13年9月12日(2001.9.12)  
(31)優先権主張番号 09/660317  
(32)優先日 平成12年9月12日(2000.9.12)  
(33)優先権主張国 米国 (U S)  
(31)優先権主張番号 09/880204  
(32)優先日 平成13年6月12日(2001.6.12)  
(33)優先権主張国 米国 (U S)

(71)出願人 500507009  
ルミレッズ ライティング ユーエス リ  
ミテッドライアビリティ カンパニー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
95131 サン ホセ ウェスト トリンプ  
ル ロード 370  
(72)発明者 マイケル ディー カムラス  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94087 サニーヴェイル ビビーン アベ  
ニュー 890  
(74)代理人 100059959  
弁理士 中村 稔 (外9名)

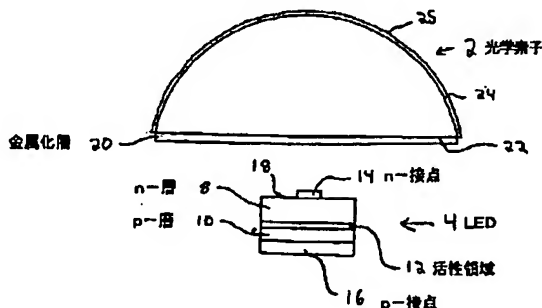
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 改良された光抽出効果を有する発光ダイオード

(57)【要約】

【課題】 発光ダイオードの光抽出効率を高めること。

【解決手段】 改良された光抽出効果を有する発光デバイスが提供される。発光デバイスは活性領域を備える半導体層を含む層のスタックを有する。スタックは、活性領域により放射される光について約1.5より大きく好ましくは約1.8より大きい屈折率を有する透明光学素子に結合される。透明光学素子（例えばレンズまたは光学濃縮器）を発光デバイスに結合させる方法は、光学素子およびスタックの温度を上昇させる工程と、光学素子と発光デバイスとをともに押し付けるために圧力を加える工程とを含む。光学素子材料のブロックについては、発光デバイスに結合させた後、光学素子として形成させることができる。高屈折率の光学素子を発光デバイスに結合させることで、全内部反射に起因する損失を低減させて、発光デバイスの光抽出効率を改良できる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 活性領域を備える半導体層を含む層のスタックを有する発光デバイスであって、前記スタックに結合される透明な光学素子を具備することを特徴とする発光デバイス。

【請求項2】 前記光学素子は光学濃縮器を含むことを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項3】 前記光学濃縮器は、放物状の壁を具備することを特徴とする請求項2に記載の発光デバイス。

【請求項4】 前記光学濃縮器は、錐形の壁を具備することを特徴とする請求項2に記載の発光デバイス。

【請求項5】 前記光学濃縮器は、傾斜した側壁を具備することを特徴とする請求項2に記載の発光デバイス。

【請求項6】 前記光学濃縮器は、金属化を用いてコーティングされる側壁を具備することを特徴とする請求項2に記載の発光デバイス。

【請求項7】 前記光学濃縮器は、誘電体材料を用いてコーティングされる側壁を具備することを特徴とする請求項2に記載の発光デバイス。

【請求項8】 前記光学素子は、全内部反射器を含むことを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項9】 前記光学素子は、光学ガラス、III-V族半導体、II-VI族半導体、IV族半導体および化合物、金属酸化物、金属フッ化物、ダイヤモンド、イットリウムアルミニウムガーネット、および、これらの組合せからなる群から選択される材料により形成されることを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項10】 前記光学素子は、酸化ジルコニウム、サファイア、GaP、ZnSおよびSiCからなる群から選択される材料により形成されることを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項11】 前記光学素子は、前記活性領域により放射される光の波長を少なくとも1つの他の波長に変換する、1つ以上のルミネセンス材料を含むことを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項12】 前記光学素子は、前記活性領域により放射される光の波長を少なくとも1つの他の波長に変換する、1つ以上のルミネセンス材料によりコーティングされることを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項13】 前記光学素子は前記スタックの表面に結合され、前記光学素子の基部の長さと前記表面の長さとの最少比が約1より大きいことを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項14】 前記比は、約2より大きいことを特徴とする請求項13に記載の発光デバイス。

【請求項15】 前記スタックは、前記光学素子の表面の凹部中に設けられることを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項16】 前記活性領域により放射される光につ

いての前記光学素子の屈折率は、約1.5より大きいことを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項17】 前記屈折率は、約1.8より大きいことを特徴とする請求項16に記載の発光デバイス。

【請求項18】 前記光学素子の屈折率は、前記活性領域により放射される光についての前記半導体層の屈折率より大きいか、または、該半導体層の屈折率に等しいことを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項19】 前記活性領域間に電圧を印加するために前記半導体層に対して電気的に接続される接点を具備することを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項20】 前記接点の少なくとも1つが、前記活性領域により放射される光について高度に反射性を有し、かつ、前記光学素子の方向に前記光を反射させるよう設けられることを特徴とする請求項19に記載の発光デバイス。

【請求項21】 前記活性領域により放射される光を前記光学素子の方向に反射するように設けられた、少なくとも1つの傾斜した側部を具備することを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項22】 前記活性領域により放射される光について高度の反射性を有する少なくとも1つの層を具備し、該層は、前記光学素子の方向に前記光を反射させるように配置されていることを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項23】 前記透明な光学素子は、前記半導体層のうち少なくとも1つに直接結合されることを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項24】 前記スタックは、前記半導体層の上に配置され、かつ、前記光学素子に直接結合される、透明上層を具備することを特徴とする請求項1に記載の発光デバイス。

【請求項25】 前記上層は、前記活性領域により放射される光について約1.8より大きい屈折率を有することを特徴とする請求項24に記載の発光デバイス。

【請求項26】 前記上層は、サファイア、SiC、GaNおよびGaPからなる群から選択される材料により形成されることを特徴とする請求項24に記載の発光デバイス。

【請求項27】 前記光学素子はZnおよびサファイアのうちの1つを備え、前記上層はSiC、GaNおよびサファイアのうちの1つを備え、前記半導体層はIII族窒化物半導体を備えることを特徴とする請求項24に記載の発光デバイス。

【請求項28】 前記活性領域間に電圧を印加するために電気的に接続される第1接点および第2接点を具備し、前記第1接点および前記第2接点は、前記スタックにおける同一の面に配置されていることを特徴とする請求項27に記載の発光デバイス。

【請求項29】 前記光学素子はGaPにより形成さ

れ、前記上層はIII族リン化合物材料により形成され、前記半導体層はIII族リン化合物半導体を備えることを特徴とする請求項24に記載の発光デバイス。

【請求項30】 前記活性領域間に電圧を印加するために電氣的に接続される第1接点および第2接点を具備し、前記第1接点および前記第2接点は、前記スタックにおける同一の面に配置されることを特徴とする請求項29に記載の発光デバイス。

【請求項31】 前記光学素子と前記スタックの表面との間に配置される透明結合層を具備し、前記透明結合層は、前記光学素子を前記スタックに結合することを特徴とする請求項29に記載の発光デバイス。

【請求項32】 前記透明結合層は、光学ガラス、カルコゲナイドガラス、III-V族半導体、II-VI族半導体、IV族半導体、有機半導体、金属、金属酸化物、金属フッ化物、イットリウムアルミニウムガーネット、リン化合物、ヒ化物、アンチモン化合物、窒化物、および、これらの組合せからなる群より選択された材料により形成されることを特徴とする請求項31に記載の発光デバイス。

【請求項33】 前記透明結合層は、前記活性領域により放射される光の波長を少なくとも1つの他の波長に変換する、1つ以上のルミネセンス材料を含むことを特徴とする請求項31に記載の発光デバイス。

【請求項34】 前記透明結合層は、前記活性領域により放射される光について約1.5より大きい屈折率を有することを特徴とする請求項31に記載の発光デバイス。

【請求項35】 前記屈折率は、約1.8より大きいことを特徴とする請求項34に記載の発光デバイス。

【請求項36】 前記結合層は、約500オングストローム未満の厚さを有することを特徴とする請求項31に記載の発光デバイス。

【請求項37】 前記表面は、前記半導体層の1つの表面を含むことを特徴とする請求項31に記載の発光デバイス。

【請求項38】 前記表面は、前記半導体層の上に配置される透明上層の表面を含むことを特徴とする請求項31に記載の発光デバイス。

【請求項39】 前記上層は、前記活性領域により放射される光について約1.8より大きい屈折率を有することを特徴とする請求項38に記載の発光デバイス。

【請求項40】 前記上層は、サファイア、SiC、GaNおよびGaPからなる群から選択される材料により形成されることを特徴とする請求項38に記載の発光デバイス。

【請求項41】 前記光学素子はZnSおよびサファイアのうちの1つを含み、前記上層はSiC、GaNおよびサファイアのうちの1つを含み、前記半導体層はIII族窒化物半導体を含むことを特徴とする請求項38に記載

の発光デバイス。

【請求項42】 前記活性領域間に電圧を印加するために電氣的に接続される第1接点および第2接点を具備し、前記第1接点および前記第2接点は、前記スタックにおける同一の面に配置されることを特徴とする請求項41に記載の発光デバイス。

【請求項43】 前記光学素子はGaPにより形成され、前記上層はIII族リン化合物材料により形成され、前記半導体層はIII族リン化合物半導体を備えることを特徴とする請求項38に記載の発光デバイス。

【請求項44】 前記活性領域間に電圧を印加するために電氣的に接続される第1接点および第2接点を具備し、前記第1接点および前記第2接点は、前記スタックにおける同一の面に配置されることを特徴とする請求項43に記載の発光デバイス。

【請求項45】 活性領域を備える半導体層を含む層のスタックを有する発光デバイスに対して透明光学素子を結合する方法であって、前記光学素子および前記スタックの温度を上昇させる工程と、前記光学素子および前記スタックをともに押し付けるために圧力を加え、これにより、前記光学素子を前記スタックに結合する工程と、を具備することを特徴とする方法。

【請求項46】 前記温度は、約500℃未満の温度にまで上昇されることを特徴とする請求項45に記載の方法。

【請求項47】 前記光学素子と前記スタックとの間に1つ以上の高拡散率の材料を配置する工程を具備することを特徴とする請求項45に記載の方法。

【請求項48】 前記光学素子および前記スタックの少なくとも1つに対して高拡散率の材料をドーピングする工程を具備することを特徴とする請求項45に記載の方法。

【請求項49】 前記光学素子と前記スタックの表面との間に透明結合材料の層を配置する工程を具備することを特徴とする請求項45に記載の方法。

【請求項50】 前記結合材料は光学ガラスを含み、前記温度は前記光学ガラスの歪み点温度付近にまで上昇されることを特徴とする請求項49に記載の方法。

【請求項51】 活性領域を備える半導体層を含む層のスタックを有する発光デバイスであって、前記スタックに結合される光学素子と、前記活性領域間に電圧を印加するために電氣的に接続される第1接点および第2接点と、を具備し、前記層のスタックは、少なくとも1つのIII族リン化合物半導体層を備え、前記第1接点および前記第2接点は、前記スタックにおける同一の面に配置されることを特徴とする発光デバイス。

【請求項52】 前記光学素子はGaPを含むことを特

徴とする請求項51に記載の発光デバイス。

【請求項53】 活性領域を備える半導体層を含む層のスタックを有する発光デバイスであって、前記スタックに結合される光学素子と、前記活性領域間に電圧を印加するために電気的に接続される第1接点および第2接点と、を具備し、前記層のスタックは、少なくとも1つのIII族窒化物半導体層を備え、前記第1接点および前記第2接点は、前記スタックにおける同一の面に配置されることを特徴とする発光デバイス。

【請求項54】 前記光学素子は、ZnSおよびサファイアのうちの1つを含むことを特徴とする請求項53に記載の発光デバイス。

【請求項55】 半導体層および光学濃縮器を含む層のスタックを備える発光デバイスを作製する方法であって、半導体層を含む層の前記スタックの上に、透明光学素子のブロックを結合する工程と、前記光学濃縮器の中に透明光学素子の前記ブロックを形成する工程と、を具備することを特徴とする方法。

【請求項56】 前記結合する工程は、前記光学素子および前記スタックの温度を上昇させる工程と、前記光学素子と前記スタックとをともに押し付けるために圧力を加える工程と、を具備することを特徴とする請求項55に記載の方法。

【請求項57】 前記形成する工程は、エッチング技術を含むことを特徴とする請求項55に記載の方法。

【請求項58】 前記エッチング技術は、ドライエッチングおよびウェットエッチングのうちの1つであることを特徴とする請求項57に記載の方法。

【請求項59】 前記ドライエッチングは、プラズマエッチング、反応性イオンエッチング、および、化学援用イオンビームエッチングのうちの1つであることを特徴とする請求項58に記載の方法。

【請求項60】 前記形成する工程は、リソグラフィ技術を含むことを特徴とする請求項55に記載の方法。

【請求項61】 前記リソグラフィ技術は、フォトリソグラフィ、電子ビームリソグラフィ、イオンビームリソグラフィ、X線リソグラフィ、および、ホログラフィックリソグラフィからなる群から選択されることを特徴とする請求項60に記載の方法。

【請求項62】 前記形成する工程は、ミリング、極細イオンビームミリング、除去、マシニング、のこ引き、圧断およびスクライビングからなる群から選択される機械的技術を含むことを特徴とする請求項55に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】(技術分野) 本発明は、広くは発光ダイオードに関し、より詳細には高められた光抽出効率を有する発光ダイオードに関する。

【0002】(背景技術) 発光ダイオード(LED)の光抽出効率は、LEDの内部量子効率に対するLEDの外部量子効率の比率として定義される。典型的には、実装されたLEDの光抽出効率は大幅に1より小さく、すなわち、LEDの活性領域で発生された光の多くは外部環境に到達しない。

【0003】光抽出効率は、LEDと周囲の材料との間の界面における全内部反射とこれに引続くその全内部反射した光のLEDでの再吸収により低下する。例えば、エポキシ中に包み込まれた透明基層上の立方体の幾何形態であるLEDについては、放射波長での屈折率( $n$ )は、例えば、LEDの半導体における $n_{\text{scmi}}$ の $\sim 3.5$ から、エポキシにおける $n_{\text{epoxy}}$ の $\sim 1.5$ まで変化する。この例における、LED半導体からエポキシ封入材に入射する光の全内部反射についての対応する臨界角 $\theta_c$ は、 $\theta_c = \arcsin(n_{\text{epoxy}}/n_{\text{scmi}}) \sim 25^\circ$ である。散乱及び多重反射を無視すれば、立方体のLEDの活性領域中の一点から $4\pi$ ステラジアンで放射された光は、半導体/エポキシ封入材の界面を、この光が、各界面に1つあり各光円錐の有する角度の半分が臨界角に等しい、6つの狭い光円錐の1つに放射されたときのみ通過する。全内部反射に起因する付加的な損失は、エポキシ/空気の界面でも起こりうる。したがって、エポキシに包み込まれた、有効通常幾何形態(例えば、直方体)の透明基板のAlInGaPのLEDは、100%近い内部量子効率を有するにも拘らず、例えば、 $\sim 40\%$ の外部量子効率を有しうるのみである。

【0004】LEDの光抽出効率に対する全内部反射の影響は、本明細書に引用により組み込まれた米国特許第5,779,924号、第5,793,062号、および、第6,015,719号中で更に論じられている。

【0005】光抽出効率を改良するための1つの手法においては、LEDが半球形状に削り落とされる。半球形状とされたLEDの活性領域中の点から放射された光は、ほぼ垂直入射で半球表面を横断する。これにより、全内部反射が低減される。しかし、この技術は、面倒であり、材料を無駄にする。加えて、この削り落としの間に発生する欠陥が、LEDの信頼性や性能を劣化させる可能性がある。

【0006】別の手法においては、LEDは、ドームまたは半球形状の表面を有する材料で包み込まれる(収納される)。例えば、上述の例のエポキシ封入材をドームに形作ることができ、エポキシ封入材/空気の界面における全内部反射に起因する損失が低減される。しかし、エポキシのような低屈折率の封入材の表面を形作るとは、半導体/低屈折率封入材の界面の全内部反射に起因する損失を低減しない。さらに、エポキシ封入材は、LED中の半導体材料の熱膨張係数との整合性に乏しい熱膨張係数を有する。したがって、エポキシ封入材は、加熱または冷却によりLEDに機械的応力を加え、LED

を損傷させることがある。LEDはまた、ドームに形作られた高屈折率のガラスに封入されるので、半導体/封入材の界面の臨界角が増大される。不運にも、高屈折率ガラス中での光の吸収、および、機械的応力は、そのようなガラス中へ封入されたLEDの性能を典型的に低下させる。

【0007】上記方法の欠点を有しない、発光ダイオードの光抽出効率を高める方法が必要とされている。

【0008】(発明の開示)改良された光抽出効率を有する発光デバイスが提供される。発光デバイスは、活性領域を備える半導体層を含む層のスタックを有する。該スタックは透明な光学素子に結合される。

【0009】いくつかの実施形態では、光学素子は、例えば、半球体のレンズ、または、フレネルレンズである。別の実施形態では、光学素子は、例えば、全内部反射器(TIR)を用いた光学濃縮器である。光学素子は、例えば、光学ガラス、III-V族半導体、II-VI族半導体、IV族半導体および化合物、金属酸化物、金属フッ化物、ダイヤモンド、サファイア、酸化ジルコニウム、イットリウムアルミニウムガーネット、または、これらの組合せにより形成される。活性領域により放射される光についての光学素子の屈折率は、好ましくは約1.5より大きく、より好ましくは約1.8より大きい。

【0010】一実施形態では、透明光学素子は、上記スタックの半導体層のうちの少なくとも1つに直接結合される。別の実施形態では、透明光学素子は、半導体層の上に配置される透明上層に直接結合される。透明上層は、活性領域により放射される光について好ましくは約1.8より大きい屈折率を有する。

【0011】他の実施形態では、発光デバイスは、光学素子と上記スタックの表面との間に配置される透明結合層を含む。この透明結合層は、上記スタックの表面に光学素子を結合させる。一実施形態では、該表面は半導体層の1つの表面を含む。別の実施形態では、上記表面は半導体層の上に配置される透明上層の表面を含む。この透明結合層は、例えば、金属、リン化合物系化合物、ヒ化物系化合物、アンチモン化合物系化合物、窒化物系化合物、または、透明光学素子について上記のように列挙した材料のいずれかにより形成される。一実施形態では、透明結合材料は、活性領域により放射された光について約1.5より大きい、好ましくは約1.8より大きい屈折率を有する。

【0012】活性領域を備える半導体層を含む層のスタックを有する発光デバイスに対して透明光学素子を結合させる方法が提供される。この方法は、光学素子およびスタックの温度を上昇させる工程と、光学素子とスタックとをともに押し付けるために圧力を加える工程と、を含む。一実施形態では、この方法は、さらにスタックと光学素子との間に透明結合材料の層を配置する工程を含む。この結合方法については、予め作製された光学素子

に対してか、または、後に形成されるか、もしくは、レンズもしくは光学濃縮器のような光学素子として形成される、光学素子材料のブロックに対して、適用することができる。

【0013】発光デバイスに対して高屈折率の光学素子を結合を結合させることにより、全内部反射に起因する損失を低減させて、発光デバイスの光抽出効率を改良することができる。封入材を使用することなくこのような改良を達成できるという利点が得られる。

【0014】(発明を実施するための最良の形態)図1Aには、本発明の実施形態にかかる、互いに結合される透明な光学素子2および発光ダイオード(LED)ダイ4が示されている。図1Bでは、本発明の一実施形態に基づいて、透明光学素子2が、透明結合層6を用いてLEDダイ4に結合される。

【0015】本明細書においては、「透明」という用語は、「透明光学素子」、「透明結合層」、「透明基層」または「透明上層」のように記述される光学素子が、吸収や散乱に起因する単一経路損失が約50%未満、好ましくは10%未満であるLEDの放射波長で、光を透過させることを示すために用いられる。LEDの放射波長は、電磁スペクトルの、赤外、可視または紫外領域にあってよい。当業者は、伝達経路長や吸収定数を種々組合せることによって、「50%未満の単一経路損失」および「10%未満の単一経路損失」である条件を満たしうることを理解できるであろう。本明細書で用いているような「光学濃縮器(optical concentrator)」は、全内部反射器に限定することなくこれを含み、かつ、入射光を反射または再指向(redirect)させる反射金属または誘電体材料によりコーティングされた壁(wall)を有する光学素子を含む。

【0016】図1Aおよび図1Bに示されるLEDダイ4は、n型伝導性(n層)の第1の半導体層8およびp型伝導性(p層)の第2の半導体層10を含む。半導体層8および10は、活性領域12に電氣的に接続される。活性領域12は、例えば、層8と層10との界面におけるp-nダイオード接合である。これに代えて、活性領域12は、ドーピングされたn型もしくはp型の、または、ドーピングされない、1つ以上の半導体層を含む。n-接点14およびp-接点16は、それぞれ半導体層8および10に電氣的に接続される。接点14と16との間に適切な電圧を印加することにより、活性領域12は光を放射する。別の実施例では、層8、10および接点14および16の伝導性の型が逆になる。すなわち、層8はp型層であり、接点14はp-接点であり、層10はn型層であり、そして接点16はn-接点である。

【0017】半導体層8と10、および活性領域12は、AlN、AlP、AlAs、AlSb、GaN、GaP、GaAs、GaSb、InN、InP、InA

s、InSbをこれらに限定されずを含むIII-V族半導体、ZnS、ZnSe、CdSe、CdTeをこれらに限定されずを含むII-VI族半導体、Ge、Si、SiCをこれらに限定されずを含むIV族半導体、およびこれらの混合物またはアロイから形成される。これらの半導体は、それら半導体が存在するLEDの典型的な放射波長において、約2.4～約4.1の範囲の屈折率を有する。例えば、GaNのようなIII族窒化物半導体は、500nmで約2.4の屈折率を有し、InGaPのようなIII族リン化合物は、600nmで約3.7の屈折率を有している。

【0018】接点14および16は、一実施例では、金、銀、ニッケル、アルミニウム、チタン、クロム、白金、パラジウム、ロジウム、レニウム、ルテニウム、タングステン、およびこれらの混合物または合金を、これらに限定されずを含む金属から形成される。他の実施例では、接点14および16の一方または両方が、インジウム錫酸化物のような透明な伝導体により形成される。

【0019】図1Aおよび図1Bは特定のLED構造を示しているが、本発明は、LEDダイ4中の半導体層の数とは無関係であり、活性領域12の細部の構造と無関係である。また、LEDダイ4は、例えば、図1Aおよび図1Bで示されない透明基層および透明上層を含むことができる。種々の数字で示されたLEDダイ4の種々の構成要素の寸法が一定の縮尺となっていないことに、留意されたい。

【0020】一実施形態では、結合材料の層が、LEDダイ4の上部表面18に付与されて透明結合層6（図1B）が形成され、この結合層で光学素子2とLEDダイ4が結合される。透明結合層6の厚さは、例えば、約1000Å（約100nm）である。結合材料は、例えば、従来の堆積技術、これらに限定するものではないが、スピニング、スパッタリング、蒸発法、化学気相蒸着法（CVD）、または、材料成長法の一部として、例えば、有機金属気相蒸着法（MOCVD）、気相エピタキシー（VPE）、液相エピタキシー（LPE）または分子線エピタキシー（MBE）による方法などを含む技術により、付与される。透明結合層6は、例えば、従来のフォトリソグラフィおよびエッチング技術により選択的にパターン付けられ、接点14を結合材で覆わないようにし、これにより、接点14が、光学素子2上の選択的な金属化層20に電気的に接触できるようにする。金属化層20は、一実施形態では、網状であり、他の実施形態では、連続的なまたはパターン付けされた層であって、例えば、約2Å～約5000Åの厚さを有し、入射光を約10%より多く、好ましくは約50%より多く透過させ、接点14に接続された、物理的に利用できる電気的接触を提供する。

【0021】金属化層20は、例えば、金属、または、インジウム錫酸化物のような透明な伝導体により形成さ

れる。

【0022】別の実施形態では、透明結合層6は、光学素子2のほぼ平坦な表面22の上に、または、金属化層20の上に形成され、例えば、従来のフォトリソグラフィおよびエッチング技術を用いて選択的にパターン付けされ、接点14と金属化層20との間に電気的接触を設けることができる。他の実施形態では、結合層6のような透明結合層は、LEDダイ4の表面18と光学素子2の表面22の両方の上に形成される。他の実施形態では、接点14は分離して設けられず、結合層6はがパターン付けされて、金属化層20とn-層8との間に電気的接触が設けられる。図1Cに示す実施形態では、接点14も結合層12も、分離して設けられず、金属化層20が付加的に結合層として機能する。他の実施形態では、接点14が表面18の上に設けられず、金属化層20は用いられない。

【0023】以下の説明では、結合層6は、LEDダイ4上に形成されていて、光学素子2の表面22の上、または、LEDダイ4および表面22の両方の上に形成されていないとみなすが、以下に記載される工程については、後者の実施形態を実現するために簡単に修正することができる。

【0024】一実施例では、透明結合層6を形成する結合材料は、高屈折率を有する光学ガラス、すなわち、活性領域12により放射された波長範囲において約1.5より大きい屈折率を有する光学ガラスである。その屈折率は、好ましくは、約1.8より大きい。透明結合層6は、例えばショットガラスSF59、すなわち、屈折率の大きいフリントガラス（flint glass）により形成される。このフリントガラスは、波長～600nm（ナノメートル）において～1.95の屈折率（n）を有し、ガラス転移温度（TG）として～362℃を有する。これに代えて、透明結合層6は、～600nmにおけるnとして～1.81およびTGとして630℃を有するショットガラスLaSF3と、～600nmにおけるnとして～1.91およびTGとして660℃を有するショットガラスLaSF N18と、これらの混合物とを、これらに限定されずを含む、高屈折率光学ガラスにより形成される。これらのガラスは、ペンシルバニア州・ジュリアにあるショット・グラス・テクノロジーズ・インコーポレーテッドより入手できる。結合層6については、また、例えば、（Ge, Sb, Ga）（S, Se）カルゴゲナイドガラスのような高屈折率カルゴゲナイドガラスにより形成することができる。

【0025】他の実施例では、結合層6は、GaP（500nmでn～3.3）、InGaP（600nmでn～3.7）、GaAs（500nmでn～3.4）およびGaN（500nmでn～2.4）を、これらに限定されずを含むIII-V族半導体；ZnS（500nmでn～2.4）、ZnSe（500nmでn～2.6）、Z



nTe (500nmで $n \sim 3.1$ )、CdS (500nmで $n \sim 2.6$ )、CdSe (500nmで $n \sim 2.6$ ) およびCdTe (500nmで $n \sim 2.7$ )を、これらに限定されずに含むII-VI族半導体；Si (500nmで $n \sim 3.5$ ) およびGe (500nmで $n \sim 4.1$ )を、これらに限定されずに含むIV族半導体および化合物；有機半導体、ならびに、酸化タングステン、酸化チタン (500nmで $n \sim 2.9$ )、酸化ニッケル (500nmで $n \sim 2.2$ )、酸化ジルコニウム (500nmで $n \sim 2.2$ )、インジウム錫酸化物および酸化クロムを、これらに限定されずに含む金属酸化物；フッ化マグネシウム (500nmで $n \sim 1.4$ )、およびフッ化カルシウム (500nmで $n \sim 1.4$ )を、これらに限定されずに含む金属フッ化物；Zn、In、MgおよびSnを、これらに限定されずに含む金属；イットリウムアルミニウムガーネット (YAG)、リン化合物系化合物、ヒ化合物系化合物、アンチモン化合物系化合物、窒化物系化合物、高屈折率有機化合物；およびそれらの混合物およびアロイ、により形成される。

【0026】一実施例では、結合層6は、活性領域12から放射された光の波長を他の波長に変換するルミネセンス材料を含む。ルミネセンス材料は、例えば、従来の蛍光体粒子、有機半導体、II-VIまたはIII-V族半導体、II-VもしくはIII-V族半導体量子ドットまたはナノクリスタル、染料、ポリマー、および欠陥中心からルミネセンスを示すGaNのような材料を含む。結合層6が従来の蛍光体粒子を含むならば、結合層6は、典型的には約5ミクロン～約50ミクロンの寸法を有する蛍光体粒子を収容するのに十分な厚みを有しなければならない。

【0027】一実施例では、結合層6は、LEDダイ4の上部層、例えば、半導体層8の屈折率より小さい屈折率を有する、高屈折率材料 (LEDの放射波長で、約1.5より大きく、好ましくは1.8より大きい屈折率の) から形成される。LEDダイ4内から半導体層8/結合層6の界面への入射光の全内部反射の臨界角が存在する。しかし、この臨界角は、LEDダイ4とエポキシまたは空気との間の怪異面についての臨界角に比べれば増大され、エポキシ封入材または空气中に抽出されるよりも多くの光が表面18を通過して結合層6中に抽出される。他の実施形態では、結合層6 (例えば、ZnSまたはZnSe) の屈折率は、半導体層8 (例えばGaN) より大きいかまたは等しく、LEDダイ4の内側から結合層6への入射光は、全内部反射されない。フレネル反射損失は、結合層6とLEDダイ4との屈折率をほぼマッチさせることにより最小にすることができるものではあるが、フレネル反射損失を無視すれば、後者の場合にもまた、エポキシ封入材または空气中に抽出されるものよりも多くの光が表面18を通過して結合層6中に抽出される。

【0028】他の実施例では、透明結合層6は、低屈折率の結合材料、すなわち、LEDの放射波長で、約1.5未満の屈折率を有する結合材料により形成される。例えば、フッ化マグネシウムが、このような結合材料の1つである。低屈折率光学ガラス、エポキシ、およびシリコンも、好適な低屈折率結合材料となりうる。低屈折率の材料から形成された透明結合層をわたる、LEDダイ4から光学素子2への効率的な光の透過については、結合層6の厚さが十分に薄ければ、達成できる、ということを実業者は理解するであろう。したがって、この実施例では、LEDダイ4/結合層6の界面での全内部反射に起因する損失は、結合層6の厚さを約500Å未満、好ましくは約100Å未満とすることにより低減される。表面18もしくは表面22の粗さ、または、表面18もしくは表面22上の不規則性の代表的な高さが、結合層6の厚さを超えるならば、光学素子2はLEDダイ4に十分には結合しないであろう。この実施形態では、表面18および22は、選択的に研磨され、結合層6の厚さ以下の程度の表面厚さが得られる。

【0029】LEDダイ4が、活性領域12により放射された光を吸収する材料を含み、結合層6が低屈折率の材料から形成され、上記のように薄くされてはいなければ、活性領域12から放射された光の大部分がLEDダイ4内に典型的に閉じ込められ、結合層自身に吸収がなくても、その光は吸収されて失われるであろう。対照的に、高屈折率の材料から形成された結合層6は、その高屈折率の結合材料が、例えば、放射光の一部を吸収するカルコゲナイドガラスのような材料であっても、典型的には、活性領域12によりLEDダイ4から放射された光のうちのより大きい部分を光学素子2に結合することになる。

【0030】透明結合層6がLEDダイ4に付与された後、光学素子2のほぼ平坦な表面22は結合層6へ向けて配置される。次いで、結合層6の温度は、ほぼ室温と約1000℃との間の温度にまで上昇され、光学素子2とLEDダイ4は、約1秒～約6時間の間、約1ポンド/平方インチ (psi) ～約6000psiの圧力で、一緒に押付けられる。本発明者らは、この工程において、剪断応力、蒸発-凝縮、液化 (または溶融または軟化)、およびそれに続く固体化、拡散または合金化を経た物質移動により、例えば、光学素子2と結合層6 (LEDダイ4上に形成された) との間にもたらされた接合によって、光学素子2がLEDダイ4に結合されると信じている。本発明者らは、別の実施例では、例えば、光学素子2とLEDダイ4の各々の上に同様に形成された結合層の間、または、結合層6 (光学素子2の上に形成された) とLEDダイ4との間の物質移動により同様にもたらされた結合により、光学素子2がLEDダイ4に結合されると信じている。よって、物質移動により特徴付けられた結合界面を、結合素子2とLEDダイ4の間

に配置することができる。一実施例では、例えば、 $n$ -層8と結合層6の界面での表面18がそのような結合界面である。他の実施例では、光学素子2およびLEDダイ4それぞれの上に形成された結合層の界面が結合界面である。他の実施例では、光学素子2と結合層6との界面が、結合界面である。

【0031】例えば、透明結合層6が、LEDダイ4の上に光学ガラスにより形成されると、一実施例では、結合層6の温度が光学ガラスの歪み点温度付近にまで上昇される。歪み点温度は、ガラス転移温度に近いがそれより低く、光学ガラスの粘度が約 $10^{14.5}$ ポアズとなる温度である。歪み点温度は、また、光学ガラスについての温度対膨張のプロットにおける最初の非線形性に対応し、アニーリング範囲の下限を表すものである。歪み点温度の近くまたはその上の温度で得られた、層6の光学ガラスの柔軟性および低下した表面張力が、光学ガラスを表面22に顕微鏡的に整合させ、光学素子2と結合層6との間の結合をもたらす。

【0032】光学素子2をLEDダイ4に結合させる上記の工程については、本明細書に引用により組み込まれた米国特許第5,502,316号および第5,376,580号に開示され、従来、半導体ウェハを高温高压のもとで互いに結合するために用いられた装置を用いて実行することができる。これら特許に開示された装置については、必要に応じLEDダイおよび光学素子を設けるよう変更することができる。これに代えて、上記の結合工程については、通常の垂直加圧機を用いて行うことができる。

【0033】透明光学素子2は、例えば、SiC(500nmで $n \sim 2.7$ )、酸化アルミニウム(サファイア、500nmで $n \sim 1.8$ )、ダイヤモンド(500nmで $n \sim 2.4$ )、または、透明結合層6における結合材料としての使用のために上記で列挙されたもののうち、金属を除く何れかの材料から形成される。光学素子2と、該光学素子2が結合されるLEDダイ4の熱膨張係数の間の不整合が大きいと、加熱または冷却に際して光学素子2がLEDダイ4から分離することが起こりうる。また、熱膨張係数をほぼ整合させることにより、結合層6および光学素子2によりLEDダイ4に引起される応力が低減される。よって、一実施例では、光学素子2は、光学素子2が結合されるLEDダイ4の熱膨張係数にほぼ整合する熱膨張係数を有する材料により形成される。

【0034】一実施形態では、透明光学素子2は、LEDダイ4から光学素子2に入射する光が垂直入射に近い入射角で光学素子2の表面24を横断するような形状と寸法を有する。表面24と周囲の媒体、典型的には空気との界面での全内部反射は、これにより低減される。加えて、入射角の範囲が狭いので、表面24でのフレネル反射損失については、表面24に対して通常の反射防

止コーティングを付与することにより低減できる。光学素子2の形状は、例えば、半球、ワイエルストラス球(上部を切り取られた球)、または、半球より小さい球の一部のような、球体的一部分である。これに代えて、光学素子2の形状は、上部を切り取られた楕円面のような楕円面的一部分である。LEDダイ4から光学素子2に入射する光についての表面24での入射角は、光学素子2の寸法が大きくなるにつれて、垂直入射により近づいていく。よって、LEDダイ4の表面18の長さに対する透明光学素子2の基部の長さの最少比率は、好ましくは、約1より大きく、約2より好ましくは、約2より大きい。

【0035】特定の材料の光学素子2が上記で定義されるような透明であり続ける最大の寸法が、LEDの放射波長での光学素子材料の吸収係数により定められることは、当業者に理解されるであろう。一実施例では、光学素子2はフレネルレンズである。フレネルレンズは、例えば、比較できる焦点距離の球面光学素子よりも典型的に薄いので、吸収が少ない。

【0036】いくつかの実施例では、光学素子2は、光学濃縮器、例えば全内部反射器(TIR)を用いた光学濃縮器を含むことができる。図1Dは、LEDダイ4に接続される光学濃縮器の一例を示す。図1Dは、放物形状を有する光学濃縮器(光学素子2)の表面23を描いているが、表面23については、錐体形状または傾斜形状のような、濃縮された光に対してデザインされた任意の形状とすることができ、かつ、金属化材料または誘電体材料によりコーティングすることができる。LEDダイ4の活性層12については、表面24での全内部反射を経験する光の量を低減するように配置する。例えば、活性層12は、光学素子2の焦点のあたりに配置される。表面23がない場合に臨界角より大きい角で表面24を横切った部分は、この部分が最初に表面23に反射すれば、上記臨界角内の角度で表面24を横切る。したがって、表面23は、光子がLEDダイ4を逃れる見込みを増加させる。

【0037】他の実施例では、光学素子2は、例えば、表面22に直交する方向において減少する、または、表面22の中心近くの最大値から放射状に減少する屈折率を有する、屈折率勾配レンズである。

【0038】一実施例では、光学素子2は、活性領域12により放射された光の波長を他の波長に変換するルミネセンス材料を含む。他の実施例では、表面22上のコーティングは、例えば、ルミネセンス材料を含む。ルミネセンス材料は、例えば、通常の蛍光体粒子、有機半導体、II-VIまたはIII-V族半導体、II-VIまたはIII-V族半導体量子ドットまたはナノクリスタル、染料、ポリマー、および、欠陥中心からルミネセンス発光するGaNのような材料、を含む。これに代えて、光学素子2の表面22に近い領域が、例えば、ルミネセンス材料で

ドーピングされる。

【0039】光学素子2、結合層6、およびLEDダイ4の上部層の屈折率の大きさ（それぞれ $n_{\text{optical element}}$ 、 $n_{\text{bond}}$ 、および $n_{\text{LED}}$ ）は、6つの順列に並べることができる。 $n_{\text{LED}} \leq n_{\text{bond}} \leq n_{\text{optical element}}$ または $n_{\text{LED}} \leq n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{bond}}$ であれば、全内部反射に起因する損失は除かれるが、フレネル損失が発生しうる。特に、 $n_{\text{LED}} = n_{\text{bond}} = n_{\text{optical element}}$ であれば、フレネルまたは全内部反射に起因する損失なしに、LEDダイ4からの光が光学素子2に入射する。これに代えて、 $n_{\text{bond}} \leq n_{\text{LED}} \leq n_{\text{optical element}}$ ではあるが、 $n_{\text{bond}} > n_{\text{epoxy}}$ であるかまたは結合層6が上述のように薄ければ、フレネル損失が無視され、エポキシ封入材または空気中に抽出されるであろうよりも多くの光が光学素子2中に抽出される。同様に、 $n_{\text{bond}} \leq n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{LED}}$ ではあるが、 $n_{\text{bond}} > n_{\text{epoxy}}$ であるか、または、結合層6が上述のように薄く、かつ、 $n_{\text{optical element}} > n_{\text{epoxy}}$ であれば、フレネル損失が無視され、エポキシ封入材または空気中に抽出されるであろうよりも多くの光が光学素子2中に抽出される。 $n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{bond}} \leq n_{\text{LED}}$ または $n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{LED}} \leq n_{\text{bond}}$ ではあるが、 $n_{\text{optical element}} > n_{\text{epoxy}}$ であれば、フレネル損失が無視され、エポキシ封入材または空気中に抽出されるよりも多くの光が光学素子2中に抽出される。よって、透明光学素子2は、LEDダイ4の放射波長で、好ましくは、約1.5より大きい屈折率を有し、より好ましくは、約1.8より大きい屈折率を有する。周囲の媒体がエポキシ封入材でなく空気（ $n_{\text{air}} \sim 1$ ）であれば、 $n_{\text{epoxy}}$ に $n_{\text{air}}$ を代入して、同様な解析が適用される。

【0040】結合層6が蛍光体粒子を含み、かつ、好ましくは高屈折率のカルコゲナイズドガラスである結合材料の屈折率が、蛍光体の屈折率とほぼ一致すれば、活性領域または蛍光体粒子により放射された光の蛍光体粒子による散乱は無視できるであろう。蛍光体粒子、結合材料、LEDダイ4の上部層（例えばn-層8）、および、光学素子の屈折率が、全てほぼ等しいことが好ましい。これは、LEDダイ4の上部層がInGaInである場合において、蛍光体粒子がSrS:Euおよび/またはSrGaS:Euであり、光学素子がZnSである場合に相当する。

【0041】図2を参照すれば、別の実施形態において、透明光学素子2が、分離された結合層を用いることなく、LEDダイ4の上部表面18に、直接結合されている。本発明者らは、剪断応力、蒸発-凝縮、液化（または溶融または軟化）、およびそれに続く固体化、拡散または合金化を経た物質移動により、光学素子2とLEDダイ4との間に結合がもたらされたものと信じている。金属化層20を設ける場合には、この金属化層は、パターン付けされ、光学素子2の表面22が直接表面1

8に接触できるようにされる。表面22もまた、選択的に、例えばエッチングによりパターン付けされる。本実施形態における一実施例では、透明光学素子2は、分離された結合層を形成するために用いられる、上記で列挙されたような材料により形成される。別の実施例では、LEDダイ4の上部層（例えば、図2におけるn-層8）を形成する材料は、結合材料として好適である。よって、光学素子2またはLEDダイ4の上部層のいずれかは、付加的に結合層として機能し、分離された結合層は不用である。一実施例では、表面18における光学素子2とLEDダイ4の界面は、例えば、光学素子2とLEDダイ4との間の物質移動により特徴付けられた結合界面である。

【0042】LEDダイ4に直接結合された光学素子2については、 $n_{\text{LED}} \leq n_{\text{optical element}}$ であるか、または、 $n_{\text{optical element}} < n_{\text{LED}}$ ではあるが $n_{\text{optical element}} > n_{\text{epoxy}}$ であれば、フレネル反射損失が無視され、エポキシ封入材中に抽出されるであろうよりも多くの光が光学素子2中に抽出される。周囲の媒体が、エポキシ封入材でなく空気（ $n_{\text{air}} \sim 1$ ）であれば、 $n_{\text{epoxy}}$ に $n_{\text{air}}$ を代入して同様な解析が適用される。

【0043】透明光学素子2は、結合層6を用いる結合工程について上述したような温度と圧力で、LEDダイ4に直接結合される。一実施例では、LEDダイ4の表面18または光学素子2の表面22は、例えばZnまたはSiのような高い拡散率を示す材料でドーピングされる。このようなドーピングは、例えば、MOCVD、VPE、LPEもしくはMBEによる材料成長の間に、または、例えば注入による材料成長の後で行われる。他の実施例では、高拡散率の材料の薄層が、表面18および22の少なくとも1つの表面上に堆積されることにより、光学素子2とLEDダイ4との間に配置される。堆積は、例えば、蒸発法またはスパッタリング法のような従来の方法により実行される。発明者らは、結合工程の間に、高拡散率の材料が光学素子2とLEDダイ4との界面を越えて拡散し、光学素子2とLEDダイ4との間の物質移動を促進させると考えている。ここで用いる高拡散率材料の量は、例えば、光学素子2とLEDダイ4の上部層の透明度を維持するのに十分少なくなければならない。例えば、光学素子2とLEDダイ4の上部層の透明度を維持するのに十分少なくなければならない。

【0044】結合方法を適用することは、予め作製された光学素子に限定されない。透明光学素子2は、上述した方法によりLEDダイ4に結合され、かつ、この後、光学素子2として形成される、透明光学素子材料のブロックでありうる。光学素子2については、おそらく、フォトリソグラフィもしくは他のリソグラフィ技術、電子ビームリソグラフィ、イオンビームリソグラフィ、X線リソグラフィ、または、ホログラフィックリソグラフィとともに、エッチングを用いて形成することができる。

プラズマエッチング、反応性イオンエッチング (RIE) および化学援用イオンビームエッチング (CAIBE) のような、ウェットエッチングまたはドライエッチング技術についても、同様に用いることができる。また、光学素子2は、イオンビームミリング (milling) もしくは極細イオンビームミリング (FIB) を用いて透明光学素子材料の表面にミリングされるか、走査型電子ビームもしくはレーザービームを用いて表面中に除去 (ablate) されるか、または、のこ引き、ミリングもしくはスクライビングにより表面中に機械的に切削される。加えて、光学素子2は、本明細書中で引用することにより組み込まれる米国特許第09/823,841号に開示された方法を用いて、透明光学素子材料のブロック中にダイス型で圧断 (stamp) される。

【0045】LEDダイ4を光学素子2に結合することは、従来のLEDダイ4を封入材に収納することに比べて好都合である。例えば、結合層を用いたまたは用いずに、上述のように光学素子2に結合されたLEDダイ4の表面18を通過する光の抽出効率、従来のエポキシ封入されたLEDに比較して改良されている。例えば、結合層を用いたまたは用いずに、上述のように光学素子2に結合されたLEDダイ4の表面18を通過する光の抽出効率は、通常のエポキシ封入されたLEDに比較して改良されている。加えて、LEDダイ4は、エポキシ封入 (収納) されたLEDにより経験される有害な応力を受けることを要しない。さらに、比較的低い温度で劣化するエポキシ封入材がないときには、LEDダイ4をより高い温度で作動させることができる。この結果、LEDダイ4の光出力については、高い電流密度でLEDを作動させることにより、増加させることができる。

【0046】しかしながら、所望とあらば、光学素子2に結合されたLEDダイ4については、付加的に例えばエポキシまたはシリコンの中に封入することができる。光学素子2に結合されたLEDダイ4のこのような封入は、光学素子2へのLEDダイ4の表面18を通過する光の抽出効率に影響を与えない。表面24と封入材との界面での全内部反射については、上述したような光学素子2の形状および寸法により、最小化することができる。

【0047】いくつかの実施例では、LEDダイ4は、例えば、高い温度で劣化する電気的接点のための金属化部位を含む。他の実施例では、LEDダイ4は、はんだ、または、銀を有しかつ高音で劣化するダイ接着エポキシを用いて、図示しないサブマウントに結合される。(ダイ接着エポキシは、エポキシ封入材と区別されることに留意せよ)。この結果、一実施例では、LEDダイ4に光学素子2を、結合層6を用いてまたは用いずに結合させる工程は、例えば、金属化部位またはダイ接着エポキシの劣化を避けるために、約500℃未満の温度で行われる。他の実施例では、光学素子2は、未完成のLED

ダイ、例えば、金属化の一部または全部が行われていないLEDダイに結合される。後者の実施例では、LEDダイ4の製作は光学素子結合工程の後に完了される。

【0048】図3、図4、図5、図6、図7、図8、図9、図10および図11に示すように、LEDダイ4の構造は、図1A、図1B、図1Cおよび図2に表された構造と異なるものでもよい。図1A、図1B、図1C、図2、図3、図4、図5、図6、図7、図8、図9、図10および図11における同様の参照符号は、種々の実施形態において同一部分を示す。

【0049】図3の実施形態において、LEDダイ4の側部26および28は傾斜しているため、それらは結合層6に対してそれぞれ90度未満の角 $\alpha$ および角 $\beta$ で交差し、活性領域12に対してそれぞれ90度を超える角 $\gamma$ および角 $\delta$ で交差する。図3には、2つの斜めの側部が示されるが、他の実施形態では、LEDダイ4は、2つより多いか、または少ない斜めの側部を有し、例えば、実質的に円錐形または角錐形である。2つより多いかまたは少ない傾斜した側部を有し、例えば、実質的に円錐形または角錐形である。

【0050】傾斜した側部26および28は、活性領域から放射した光を結合層6の方向に反射する。傾斜した側部26および28がない場合には、LEDダイ4内に閉じ込められたまたはダイの側部から外へ失われる光が、これにより、都合よく結合層6および光学素子2を通じて抽出される。一実施形態では、LEDダイ4は、空気のような低屈折率の媒体により取り囲まれており、活性領域12から傾斜した側部26および28に入射した光の一部は全内部反射して結合層6へ向かう。他の実施形態では、傾斜した側部26および28は、結合層6の方向に光を反射させる反射性のコーティング、すなわち、一実施例では金属層、他の実施例では誘電体層を用いて、コーティングされる。

【0051】一実施形態では、接点16は高度に反射性である。したがって、この実施形態では、接点16に入射した光は、直接または側部26もしくは28からの付加的な反射の後、結合層6の方向に反射される。この結果、LEDダイ4の光抽出効率は、増加する。

【0052】図4および図5に示した実施形態では、LEDダイ4は、金属化層20に電気的に接続され、かつ、n-層8に電気的に接続された伝導性の透明な上層30と、p-層10および接点16に電気的に連結された、伝導性を有する、選択的に設けられる透明な基層32を含む。上層30および (選択的に設けられる) 基層32は、例えば、LEDダイ4により放射される光子のエネルギーより大きいバンドギャップエネルギーを有する半導体により形成される。上層30は、好ましくは約1.5より大きく、より好ましくは約1.8より大きい、活性領域12の放射波長での屈折率を有する材料に

より形成される。他の実施例では、上述のように、LEDダイ4の側部26および28は、傾斜しており、かつ、高度に反射性であり、接点16は高度に反射性である。図4に示した実施形態では、透明光学素子2は、結合層6により上層30に結合され、n-層8は、n-接点14により金属化層20に電氣的に接続される。図5に示した実施形態では、透明光学素子2は、上層30に直接結合され、n-接点14は、分離しては設けられない。

【0053】図6および図7に示した「フリップチップ」実施形態では、接点14および接点16は、LEDダイ4の同一側に配置される。光学素子2は、LEDダイ4において接点14および16の反対側に結合されるので、これらの実施形態では、光学素子2の上には金属化層が不要となる。金属化層がないことにより、光学素子2への光抽出効率が向上する。他の実施例では、上述したように、LEDダイ4における側部26および28は、傾斜しており、かつ、高度に反射性を有する。接点16は高度に反射性である。透明上層34は、例えば、サファイア、SiC、GaNまたはGaPのような、活性領域12の放射波長で、好ましくは約1.5より大きく、より好ましくは約1.8より大きい屈折率を有する材料により形成される。図6に示した実施形態では、光学素子2は、結合層6を用いて透明上層34に結合される。図7に示した実施形態では、光学素子2は、透明上層34に直接に結合される。

【0054】図6および図7に示した実施形態のうちの、一実施例では、光学素子2はZnSにより形成され、上層34はSiCまたはGaNにより形成され、n-層8はGaNのようなIII族窒化物半導体により形成される。他の実施例では、光学素子2はGaPから形成され、上層34はGaPにより形成され、n-層8はAlInGaPアロイのようなIII族リン化合物半導体により形成される。結合層6を設ける場合には、この結合層は、例えばZnSにより形成される。

【0055】図8および図9に示した実施形態では、n-層8、p-層10および活性領域12の方向は、光学素子2とほぼ直交する。図6および図7に示した実施形態と同様に、光学素子2の上には、金属化層は必要とされない。図8に示した実施形態では、光学素子2は、結合層6を用いてLEDダイ4に結合される。図9に示した実施形態では、光学素子2は、LEDダイ4に直接に結合される。一実施例では、LEDダイ4は、層8と層10に、かつ、活性領域12に対してほぼ直交する方向に作られた切片を用いて、ウェハから切り出される（「ダイスされる」）。この実施例では、光学素子2に結合されるLEDダイ4の表面は、選択的に研磨され、その粗さが低減される。他の実施例では、LEDダイ4の側部26および28は傾斜しており、接点14および接点16は高度に反射性を有し、光を光学素子2に反射

させるために反射層36が配置される。

【0056】図10および図11の実施形態では、LEDダイ4は、LEDダイ4が結合される光学素子2の表面22中の凹部38に配置される。図10に示した実施形態では、光学素子2は、LEDダイ4に直接に結合される。図11の実施形態では、光学素子2は、結合層6を用いてLEDダイ4に結合される。

【0057】詳細な実施形態を用いて本発明を説明しているが、本発明は、添付した請求項の範囲に含まれる変形および変更のすべてを包含するものである。

【0058】本明細書は、2000年9月12日に出願された米国特許一部継続出願第09/660317号に基づくものであり、この出願の内容については、引用することにより本明細書に含めておく。

【図面の簡単な説明】

【図1A】本発明の一実施形態にかかる互いに結合される光学素子および発光ダイオードの概略図

【図1B】本発明の一実施形態にかかる結合層を用いて発光ダイオードに結合される光学素子の概略図

【図1C】本発明の別の実施形態にかかる発光ダイオードに結合される光学素子の概略図

【図1D】本発明の別の実施形態にかかる発光ダイオードに結合される光学濃縮器の概略図

【図2】本発明の別の実施形態にかかる発光ダイオードに直接に結合される光学素子の概略図

【図3】本発明の一実施形態にかかる結合層を用いて傾斜した側部を有する発光ダイオードに結合される光学素子の概略図

【図4】本発明の一実施形態にかかる結合層を用いて基層および上層を有する発光ダイオードに結合される光学素子の概略図

【図5】本発明の一実施形態にかかる基層および上層を有する発光ダイオードに直接に結合される光学素子の概略図

【図6】本発明の一実施形態にかかる結合層を用いて「フリップチップ」幾何形態を有する発光ダイオードに結合される光学素子の概略図

【図7】本発明の一実施形態にかかる「フリップチップ」幾何形態を有する発光ダイオードに直接に結合される光学素子の概略図

【図8】光学素子にはほぼ垂直な活性領域を有する発光ダイオードに対して結合層を用いて結合される該光学素子の概略図

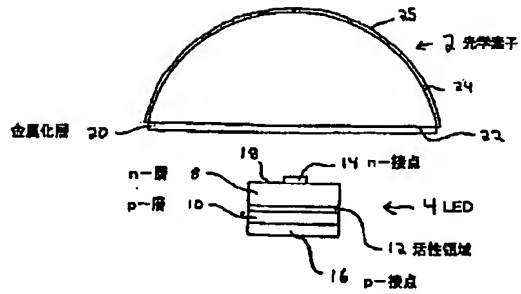
【図9】光学素子にはほぼ垂直な活性領域を有する発光ダイオードに対して直接に結合される該光学素子の概略図

【図10】光学素子の表面における凹部内に配置され、かつ、該光学素子に直接に結合される発光ダイオードの概略図

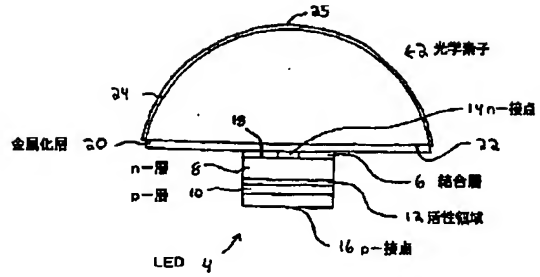
【図11】光学素子の表面における凹部内に配置され、かつ、結合層を用いて該光学素子に結合される発光ダイ

オードの概略図

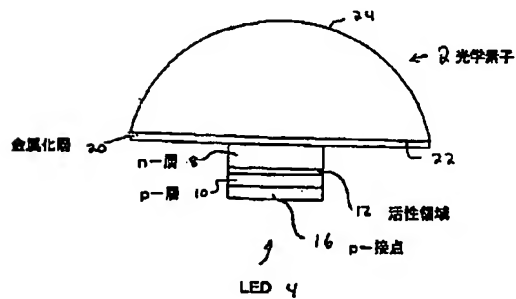
【図1A】



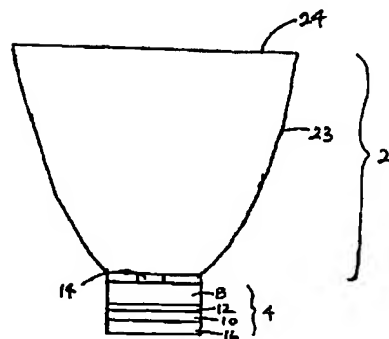
【図1B】



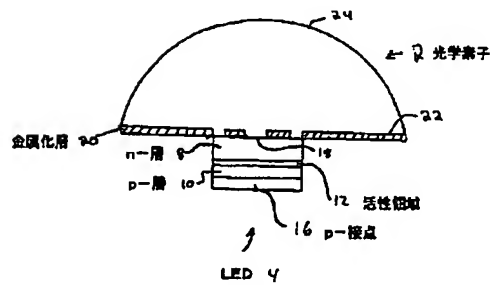
【図1C】



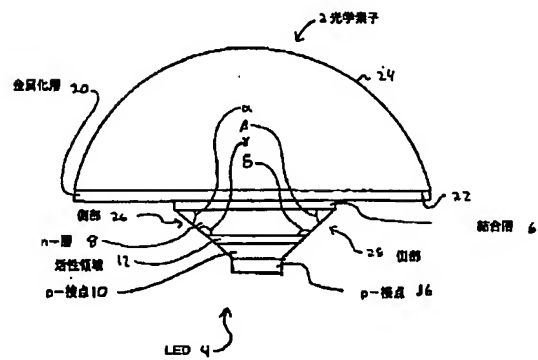
【図1D】



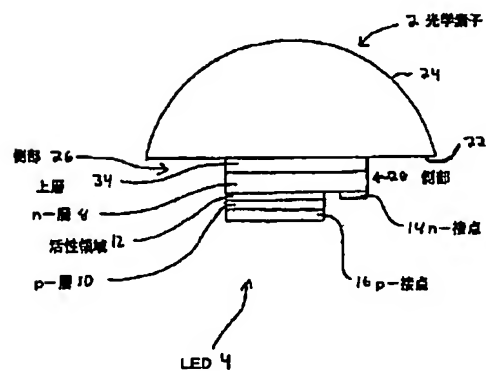
【図2】



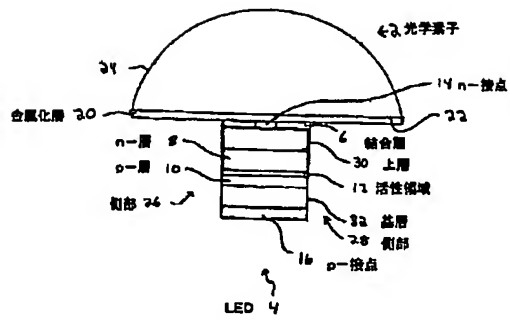
【図3】



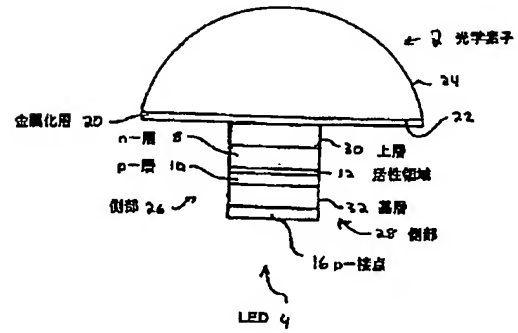
【図7】



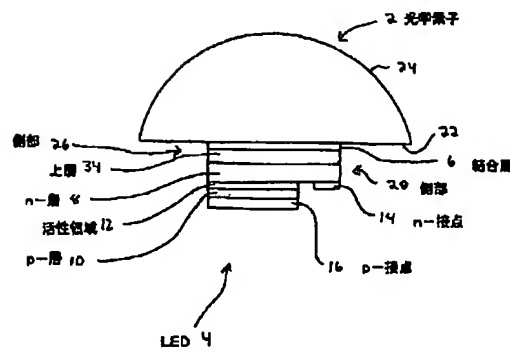
【圖4】



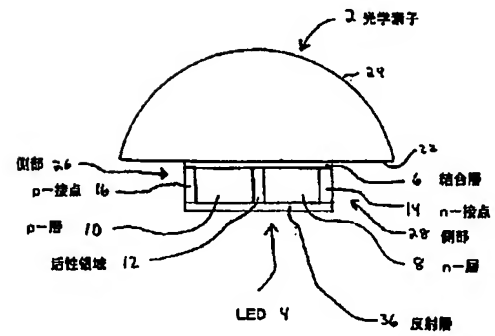
【圖5】



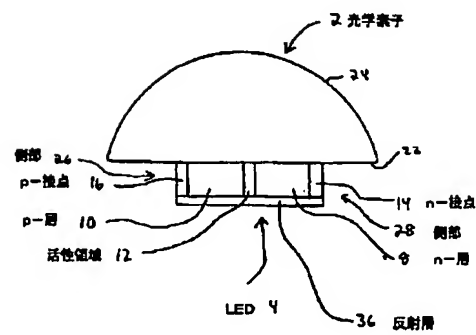
【圖6】



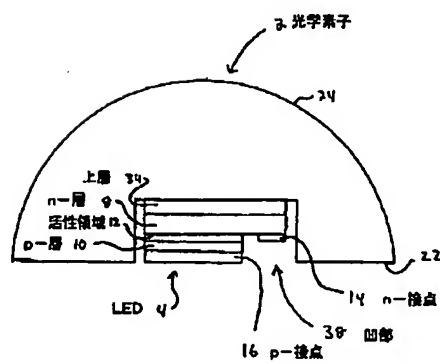
【圖8】



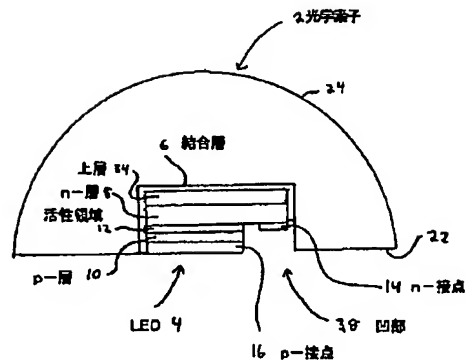
【圖9】



【圖10】



【図11】



フロントページの続き

(72)発明者 マイケル アール クレイムス  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94041 マウンテン ビュー フロント  
レーン 550

(72)発明者 ウェイン エル スナイダー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94306 パロ アルト クーバ ストリー  
ト 3365

(72)発明者 フランク エム ステランカ  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
95120-3203 サン ホセ オウグレイデ  
ィ ドライヴ 7086

(72)発明者 ロバート シー テイバー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94301 パロ アルト キブリング スト  
リート 328

(72)発明者 ジョン ジェイ ユビング  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94306 パロ アルト タウル ウェイ  
665

(72)発明者 ダグラス ダブリュ ポシアス  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94087-1243 サニーヴェイル ビア  
アベニュー 804

(72)発明者 トロイ エイ トロティアー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
95126 サン ホセ マッキンリー アベ  
ニュー 1546

(72)発明者 クリストファー エイチ ロウェリー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94539 フリーモント ラ ビューリシマ  
ウェイ 40570

(72)発明者 ガード オー ミューラー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
95132 サン ホセ スウェイガート ロ  
ード 3491

(72)発明者 レジーナ ビー ミューラー マック  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
95132 サン ホセ スウェイガート ロ  
ード 3491

(72)発明者 グロリア イー ホフラー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
94087 サニーヴェイル カンバーランド  
ドライヴ 863

Fターム(参考) 5F041 AA04 CA34 CA40 CA65 CA74  
CA76 EE17 EE23 EE25



【外国語明細書】

**LIGHT EMITTING DIODES WITH IMPROVED LIGHT EXTRACTION  
EFFICIENCY**

**RELATED APPLICATIONS**

This application is a Continuation-In-Part of U.S. Patent Application Serial No. 09/660317 filed on September 12, 2000, which is herein incorporated by reference in its entirety.

**BACKGROUND OF THE INVENTION**

1. Field of the Invention

The present invention relates generally to light emitting devices and more particularly to light emitting diodes with enhanced light extraction efficiency.

## 2. Description of the Related Art

The light extraction efficiency of a light emitting diode (LED) is defined as the ratio of the LED's external quantum efficiency to the LED's internal quantum efficiency. Typically, the light extraction efficiency of a packaged LED is substantially less than one, i.e., much of the light generated in the LED's active region never reaches the external environment.

Light extraction efficiency is reduced by total internal reflection at interfaces between the LED and surrounding material followed by reabsorption of the totally internally reflected light in the LED. For example, for a cubic geometry LED on a transparent substrate encapsulated in epoxy, the refractive index ( $n$ ) at the emission wavelength changes from a value of, for example,  $n_{\text{semi}} \sim 3.5$  in the LED semiconductor to  $n_{\text{epoxy}} \sim 1.5$  in the epoxy. The corresponding critical angle for total internal reflection of light incident on the epoxy encapsulant from the LED semiconductor of this example is  $\theta_c = \arcsin(n_{\text{epoxy}}/n_{\text{semi}}) \sim 25^\circ$ . Neglecting scattering and multiple reflections, light emitted over  $4\pi$  steradians from a point in the active region of the cubic LED crosses a semiconductor / epoxy encapsulant interface only if it is emitted into one of six narrow light cones, one for each interface, with each light cone having a half angle equal to the critical angle. Additional losses due to total internal reflection can occur at the epoxy / air interface. Consequently, an efficient conventional geometry (for example, rectangular parallelepiped) transparent substrate AlInGaP LED encapsulated in epoxy, for example, may have an external quantum efficiency of only  $\sim 40\%$ , despite having an internal quantum efficiency of nearly 100 %.

The effect of total internal reflection on the light extraction efficiency of LEDs is further discussed in U.S. Patents 5,779,924; 5,793,062; and 6,015,719 incorporated herein by reference.

In one approach to improving light extraction efficiency, LEDs are ground into hemispherical shapes. Light emitted from a point in the active region of a hemispherically shaped LED intersects the hemispherical interface at near normal incidence. Thus, total internal reflection is reduced. However, this technique is tedious

and wasteful of material. In addition, defects introduced during the grinding process may compromise the reliability and performance of the LEDs.

In another approach, LEDs are encapsulated (encased) in a material with a dome or hemispherically shaped surface. For example, the epoxy encapsulant of the above example may be dome shaped to reduce losses due to total internal reflection at the epoxy encapsulant / air interface. However, shaping the surface of a low refractive index encapsulant such as epoxy does not reduce losses due to total internal reflection at the semiconductor / low index encapsulant interface. Moreover, epoxy encapsulants typically have coefficients of thermal expansion that poorly match those of the semiconductor materials in the LED. Consequently, the epoxy encapsulant subjects the LED to mechanical stress upon heating or cooling and may damage the LED. LEDs are also encapsulated in dome shaped high index glasses, which increase the critical angle for the semiconductor / encapsulant interface. Unfortunately, optical absorption in high index glasses and mechanical stress typically degrade the performance of an LED encapsulated in such glass.

What is needed is a method for increasing the light extraction efficiency of light emitting diodes which does not suffer from the drawbacks of previous methods.

## SUMMARY

Light emitting devices with improved light extraction efficiency are provided. The light emitting devices have a stack of layers including semiconductor layers comprising an active region. The stack is bonded to a transparent optical element.

In some embodiments, the optical element is a lens, for example a hemispheric lens or a Fresnel lens. In other embodiments, the optical element is an optical concentrator using, for example, a total internal reflector (TIR). The optical element is formed, for example, from optical glass, III-V semiconductors, II-VI semiconductors, group IV semiconductors and compounds, metal oxides, metal fluorides, diamond, sapphire, zirconium oxide, yttrium aluminum garnet, or combinations thereof. The

refractive index of the optical element for light emitted from the active region is preferably greater than about 1.5, more preferably greater than about 1.8.

In one embodiment, the transparent optical element is directly bonded to at least one of the semiconductor layers of the stack. In another embodiment, the transparent optical element is directly bonded to a transparent superstrate disposed above the semiconductor layers. The transparent superstrate preferably has a refractive index for light emitted from the active region greater than about 1.8.

In other embodiments, the light emitting device includes a transparent bonding layer disposed between the optical element and a surface of the stack. The transparent bonding layer bonds the optical element to the surface of the stack. In one embodiment, the surface includes a surface of one of the semiconductor layers. In another embodiment, the surface includes a surface of a transparent superstrate layer disposed above the semiconductor layers. The transparent bonding layer is formed, for example, from metals, phosphide compounds, arsenide compounds, antimonide compounds, nitride compounds, or any of the materials listed above for the transparent optical element. In one embodiment, the transparent bonding material has an index of refraction for light emitted from the active region greater than about 1.5, preferably greater than about 1.8.

A method of bonding a transparent optical element to a light emitting device having a stack of layers including semiconductor layers comprising an active region is provided. The method includes elevating a temperature of the optical element and the stack and applying a pressure to press the optical element and the stack together. In one embodiment, the method also includes disposing a layer of a transparent bonding material between the stack and the optical element. The bonding method can be applied to a pre-made optical element or to a block of optical element material which is later formed or shaped into an optical element such as a lens or an optical concentrator.

Bonding a high refractive index optical element to a light emitting device improves the light extraction efficiency of the light emitting device by reducing loss due to total internal reflection. Advantageously, this improvement can be achieved without the use of an encapsulant.

## **BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS**

Figure 1A is a schematic diagram of an optical element and a light emitting diode to be bonded to each other in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 1B is a schematic diagram of an optical element bonded with a bonding layer to a light emitting diode in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 1C is a schematic diagram of an optical element bonded to a light emitting diode in accordance with another embodiment of the present invention.

Figure 1D is a schematic diagram of an optical concentrator bonded to a light emitting diode in accordance with another embodiment of the present invention.

Figure 2 is a schematic diagram of an optical element directly bonded to a light emitting diode in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 3 is a schematic diagram of an optical element bonded with a bonding layer to a light emitting diode having beveled sides in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 4 is a schematic diagram of an optical element bonded with a bonding layer to a light emitting diode having substrate and superstrate layers in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 5 is a schematic diagram of an optical element directly bonded to a light emitting diode having substrate and superstrate layers in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 6 is a schematic diagram of an optical element bonded with a bonding layer to a light emitting diode having a "flip chip" geometry in accordance with an embodiment of the present invention.

Figure 7 is a schematic diagram of an optical element directly bonded to a light emitting diode having a "flip chip" geometry in accordance with an embodiment of the present invention

Figure 8 is a schematic diagram of an optical element bonded with a bonding layer to a light emitting diode having an active region substantially perpendicular to the optical element.

Figure 9 is a schematic diagram of an optical element bonded directly to a light emitting diode having an active region substantially perpendicular to the optical element.

Figure 10 is a schematic diagram of a light emitting diode located in a recess of a surface of an optical element to which it is directly bonded.

Figure 11 is a schematic diagram of a light emitting diode located in a recess of a surface of an optical element to which it is bonded with a bonding layer.

## DETAILED DESCRIPTION

Figure 1A depicts a transparent optical element 2 and a light emitting diode (LED) die 4 to be bonded to each other in accordance with an embodiment of the present invention. In Figure 1B, in accordance with one embodiment of the present invention, transparent optical element 2 is bonded to LED die 4 with a transparent bonding layer 6.

The term "transparent" is used herein to indicate that an optical element so described, such as a "transparent optical element," a "transparent bonding layer," a "transparent substrate," or a "transparent superstrate" transmits light at the emission wavelengths of the LED with less than about 50%, preferably less than about 10%, single pass loss due to absorption or scattering. The emission wavelengths of the LED may lie in the infrared, visible, or ultraviolet regions of the electromagnetic spectrum. One of ordinary skill in the art will recognize that the conditions "less than 50% single pass loss" and "less than 10% single pass loss" may be met by various combinations of transmission path length and absorption constant. As used herein, "optical concentrator" includes but

is not limited to total internal reflectors, and includes optical elements having a wall coated with a reflective metal or a dielectric material to reflect or redirect incident light.

LED die 4 illustrated in Figures 1A and 1B includes a first semiconductor layer 8 of n-type conductivity (n-layer) and a second semiconductor layer 10 of p-type conductivity (p-layer). Semiconductor layers 8 and 10 are electrically coupled to active region 12. Active region 12 is, for example, a p-n diode junction associated with the interface of layers 8 and 10. Alternatively, active region 12 includes one or more semiconductor layers that are doped n-type or p-type or are undoped. N-contact 14 and p-contact 16 are electrically coupled to semiconductor layers 8 and 10, respectively. Active region 12 emits light upon application of a suitable voltage across contacts 14 and 16. In alternative implementations, the conductivity types of layers 8 and 9, together with contacts 14 and 16, are reversed. That is, layer 8 is a p-type layer, contact 14 is a p-contact, layer 10 is an n-type layer, and contact 16 is an n-contact.

Semiconductor layers 8 and 10 and active region 12 are formed from III-V semiconductors including but not limited to AlN, AlP, AlAs, AlSb, GaN, GaP, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb, II-VI semiconductors including but not limited to ZnS, ZnSe, CdSe, CdTe, group IV semiconductors including but not limited to Ge, Si, SiC, and mixtures or alloys thereof. These semiconductors have indices of refraction ranging from about 2.4 to about 4.1 at the typical emission wavelengths of LEDs in which they are present. For example, III-Nitride semiconductors such as GaN have refractive indices of about 2.4 at 500 nm, and III-Phosphide semiconductors such as InGaP have refractive indices of about 3.7 at 600 nm.

Contacts 14 and 16 are, in one implementation, metal contacts formed from metals including but not limited to gold, silver, nickel, aluminum, titanium, chromium, platinum, palladium, rhodium, rhenium, ruthenium, tungsten, and mixtures or alloys thereof. In another implementation, one or both of contacts 14 and 16 are formed from transparent conductors such as indium tin oxide.

Although Figures 1A and 1B illustrate a particular LED structure, the present invention is independent of the number of semiconductor layers in LED die 4, and independent of the detailed structure of active region 12. Also, LED die 4 may include,

for example, transparent substrates and superstrates not illustrated in Figures 1A and 1B. It should be noted that dimensions of the various elements of LED die 4 illustrated in the various figures are not to scale.

In one embodiment, a layer of bonding material is applied to a top surface 18 of LED die 4 (Figure 1A) to form transparent bonding layer 6 (Figure 1B) with which to bond optical element 2 to LED die 4. Transparent bonding layer 6 is, for example, about 10 Angstroms (Å) to about 100 microns (μm) thick. The bonding material is applied, for example, by conventional deposition techniques including but not limited to spinning, sputtering, evaporation, chemical vapor deposition (CVD), or as part of material growth by, for example, metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD), vapor phase epitaxy (VPE), liquid phase epitaxy (LPE), or molecular beam epitaxy (MBE). Transparent bonding layer 6 is optionally patterned with, for example, conventional photolithographic and etching techniques to leave contact 14 uncovered by bonding material and thus to permit contact 14 to make electrical contact with optional metallization layer 20 on optical element 2. Metallization layer 20, in one embodiment a mesh and in other embodiments a continuous or patterned layer, for example, about 2 Å to about 5000 Å thick, transmits greater than about 10%, preferably greater than about 50%, of incident light and provides a physically accessible electrical contact coupled to contact 14. Metallization layer 20 is formed, for example, from metals or transparent conductors such as indium tin oxide.

In an alternative embodiment, transparent bonding layer 6 is formed on substantially flat surface 22 of optical element 2 or on the surface of metallization layer 20 and optionally patterned with, for example, conventional photolithographic and etching techniques to permit electrical contact between contact 14 and metallization layer 20. In another embodiment transparent bonding layers such as bonding layer 6 are formed on both surface 18 of LED die 4 and surface 22 of optical element 2. In other embodiments, contact 14 is not separately provided, and bonding layer 6 is patterned to permit electrical contact between metallization layer 20 and n-layer 8. In the embodiment shown in Figure 1C, neither contact 14 nor bonding layer 6 is separately provided, and metallization layer 20 additionally functions as a bonding layer. In other embodiments, contact 14 is not located on surface 18 and the metallization layer 20 is not used.



Though the following discussion assumes that bonding layer 6 is formed on LED die 4 rather than on surface 22 of optical element 2 or on both LED die 4 and surface 22, the process described below can be simply modified to implement the latter embodiments.

In one implementation, the bonding material from which transparent bonding layer 6 is formed is a high index optical glass, i.e., an optical glass having a refractive index greater than about 1.5 in the range of wavelengths emitted by active region 12. Preferably, the refractive index is greater than about 1.8. Transparent bonding layer 6 is formed, for example, from Schott glass SF59, a dense flint glass which has refractive index ( $n$ )  $\sim 1.95$  at  $\sim 600$  nanometers (nm) and a glass transition temperature ( $T_G$ )  $\sim 362^\circ\text{C}$ . Alternatively, transparent bonding layer 6 is formed from high index optical glasses including but not limited to Schott glass LaSF 3, with  $n \sim 1.81$  at  $\sim 600$  nm and  $T_G \sim 630^\circ\text{C}$ ; Schott glass LaSF N18, with  $n \sim 1.91$  at  $\sim 600$  nm and  $T_G \sim 660^\circ\text{C}$ ; and mixtures thereof. These glasses are available from Schott Glass Technologies Incorporated, of Duryea, PA. Bonding layer 6 may also be formed from a high index chalcogenide glass, such as (Ge,Sb,Ga)(S,Se) chalcogenide glasses, for example.

In other implementations, bonding layer 6 is formed from III-V semiconductors including but not limited to GaP ( $n \sim 3.3$  at 600 nm), InGaP ( $n \sim 3.7$  at 600 nm), GaAs ( $n \sim 3.4$  at 500 nm), and GaN ( $n \sim 2.4$  at 500 nm); II-VI semiconductors including but not limited to ZnS ( $n \sim 2.4$  at 500 nm), ZnSe ( $n \sim 2.6$  at 500 nm), ZnTe ( $n \sim 3.1$  at 500 nm), CdS ( $n \sim 2.6$  at 500 nm), CdSe ( $n \sim 2.6$  at 500 nm), and CdTe ( $n \sim 2.7$  at 500 nm); group IV semiconductors and compounds including but not limited to Si ( $n \sim 3.5$  at 500 nm), and Ge ( $n \sim 4.1$  at 500 nm); organic semiconductors, metal oxides including but not limited to tungsten oxide, titanium oxide ( $n \sim 2.9$  at 500 nm), nickel oxide ( $n \sim 2.2$  at 500 nm), zirconium oxide ( $n \sim 2.2$  at 500 nm), indium tin oxide, and chromium oxide; metal fluorides including but not limited to magnesium fluoride ( $n \sim 1.4$  at 500 nm) and calcium fluoride ( $n \sim 1.4$  at 500 nm); metals including but not limited to Zn, In, Mg, and Sn; yttrium aluminum garnet (YAG), phosphide compounds, arsenide compounds, antimonide compounds, nitride compounds, high index organic compounds; and mixtures or alloys thereof.

Bonding layer 6 includes, in one implementation, luminescent material that converts light of wavelengths emitted by active region 12 to other wavelengths. The luminescent material includes, for example, conventional phosphor particles, organic semiconductors, II-VI or III-V semiconductors, II-VI or III-V semiconductor quantum dots or nanocrystals, dyes, polymers, and materials such as GaN that luminesce from defect centers. If bonding layer 6 includes conventional phosphor particles, then bonding layer 6 should be thick enough to accommodate particles typically having a size of about 5 microns to about 50 microns.

In one implementation, bonding layer 6 is formed from a high index material (refractive index at the LED's emission wavelengths greater than about 1.5, preferably greater than about 1.8) having a refractive index less than that of the top layer of LED die 4, for example, semiconductor layer 8. Hence, a critical angle exists for total internal reflection of light incident on the semiconductor layer 8 / bonding layer 6 interface from inside LED die 4. This critical angle is increased compared to the critical angle for an interface between LED die 4 and epoxy or air, however, and more light is extracted through surface 18 into bonding layer 6 than would be extracted into an epoxy encapsulant or air. In another implementation, the refractive index of bonding layer 6 (for example, ZnS or ZnSe) is greater than or equal to that of semiconductor layer 8 (for example, GaN), and none of the light incident on bonding layer 6 from inside LED die 4 is totally internally reflected. Neglecting Fresnel reflection losses, which can be minimized by approximately matching the refractive indices of bonding layer 6 and the top layer of LED die 4, in the latter case also more light is extracted through surface 18 into bonding layer 6 than would be extracted into an epoxy encapsulant or air.

In another implementation, transparent bonding layer 6 is formed from a low index bonding material, i.e., a bonding material having a refractive index less than about 1.5 at the LED's emission wavelengths. Magnesium fluoride, for example, is one such bonding material. Low index optical glasses, epoxies, and silicones may also be suitable low index bonding materials. One of ordinary skill in the art will recognize that efficient transmission of light from LED die 4 across transparent bonding layer 6, formed from a low index material, to optical element 2 can be achieved if bonding layer 6 is sufficiently thin. Accordingly, in this implementation losses due to total internal reflection at the

LED die 4 / bonding layer 6 interface are reduced by making the thickness of bonding layer 6 less than about 500 Å, preferably less than about 100 Å. Optical element 2 might bond poorly to LED die 4 if the roughness of surface 18 or surface 22 or typical height of irregularities on surface 18 or surface 22 exceed the thickness of bonding layer 6. In this embodiment, surfaces 18 and 22 are optionally polished to achieve a surface roughness of magnitude less than or equal to the thickness of bonding layer 6.

If LED die 4 includes material that absorbs light emitted by active region 12, and if bonding layer 6 is formed from a low index material but is not thin as described above, then a large portion of the light emitted by active region 12 will typically be trapped in LED die 4 and lost to absorption even if bonding layer 6 is itself nonabsorbing. In contrast, a bonding layer 6 formed from a high index material will typically couple a larger fraction of light emitted by active region 12 out of LED die 4 into optical element 2, even if the high index bonding material is a material such as a chalcogenide glass, for example, which absorbs a portion of the emitted light.

After transparent bonding layer 6 is applied to LED die 4, the substantially flat surface 22 of optical element 2 is placed against bonding layer 6. The temperature of bonding layer 6 is then raised to a temperature between about room temperature and about 1000°C, and optical element 2 and LED die 4 are pressed together for a period of time of about one second to about 6 hours at a pressure of about 1 pound per square inch (psi) to about 6000 psi. The inventors believe that in this process optical element 2 is bonded to LED die 4 by a bond effected between optical element 2 and bonding layer 6 (formed on LED die 4) by, for example, material transfer via shear stress, evaporation-condensation, liquification (or melting or softening) followed by solidification, diffusion, or alloying. The inventors believe that in other implementations optical element 2 is bonded to LED die 4 by a bond similarly effected by, for example, material transfer between bonding layers formed on each of optical element 2 and LED die 4 or between bonding layer 6 (formed on optical element 2) and LED die 4. Thus, a bonded interface characterized by material transfer may be disposed between optical element 2 and LED die 4. In one implementation, for example, surface 18 at the interface of n-layer 8 and bonding layer 6 is such a bonded interface. In another implementation, an interface of bonding layers formed on each of optical element 2 and LED die 4 is a bonded interface.

In another implementation, an interface of optical element 2 and bonding layer 6 is a bonded interface.

If transparent bonding layer 6 is formed on LED die 4 from an optical glass, for example, then in one implementation the temperature of bonding layer 6 is raised to about the strain point temperature of the optical glass. The strain point temperature, which is near to but less than the glass transition temperature ( $T_g$ ), is the temperature at which the optical glass has a viscosity of about  $10^{14.5}$  poises. The strain point temperature also corresponds to the first nonlinearity in a plot of expansion versus temperature for the optical glass, and thus represents the lower limit of the annealing range. The resulting flexibility and lowered surface tension of the optical glass in layer 6 at temperatures near or above the strain point temperature allow the optical glass to microscopically conform to surface 22 and to effect a bond between optical element 2 and bonding layer 6.

The process of bonding optical element 2 to LED die 4 described above may be performed with devices disclosed in U.S. Patents 5,502,316 and 5,376,580, incorporated herein by reference, previously used to bond semiconductor wafers to each other at elevated temperatures and pressures. The disclosed devices may be modified to accommodate LED dice and optical elements, as necessary. Alternatively, the bonding process described above may be performed with a conventional vertical press.

Transparent optical element 2 is formed, for example, from SiC ( $n \sim 2.7$  at 500 nm), aluminum oxide (sapphire,  $n \sim 1.8$  at 500 nm), diamond ( $n \sim 2.4$  at 500 nm), or any of the materials listed above for use as bonding materials in transparent bonding layer 6, excluding the metals. A severe mismatch between the thermal expansion coefficients of optical element 2 and LED die 4 to which optical element 2 is bonded can cause optical element 2 to detach from LED die 4 upon heating or cooling. Also, approximately matching thermal expansion coefficients reduces the stress induced in LED die 4 by bonding layer 6 and optical element 2. Hence, in one implementation optical element 2 is formed from a material having a thermal expansion coefficient approximately matching the thermal expansion coefficient of LED die 4 to which optical element 2 is bonded.

In one embodiment, transparent optical element 2 has a shape and a size such that light entering optical element 2 from LED die 4 will intersect surface 24 of optical

element 2 at angles of incidence near normal incidence. Total internal reflection at the interface of surface 24 and the ambient medium, typically air, is thereby reduced. In addition, since the range of angles of incidence is narrow, Fresnel reflection losses at surface 24 can be reduced by applying a conventional antireflection coating 25 to surface 24. The shape of optical element 2 is, for example, a portion of a sphere such as a hemisphere, a Weierstrass sphere (truncated sphere), or a portion of a sphere less than a hemisphere. Alternatively, the shape of optical element 2 is a portion of an ellipsoid such as a truncated ellipsoid. The angles of incidence at surface 24 for light entering optical element 2 from LED die 4 more closely approach normal incidence as the size of optical element 2 is increased. Hence, the smallest ratio of a length of the base of transparent optical element 2 to a length of the surface 18 of LED die 4 is preferably greater than about 1, more preferably greater than about 2.

One of ordinary skill in the art will recognize that the maximum size for which an optical element 2 of a particular material continues to be transparent as defined above is determined by the absorption constant of the optical element material at the emission wavelengths of the LED. In one implementation, optical element 2 is a Fresnel lens. Fresnel lenses are typically thinner than, for example, spherical optical elements of comparable focal lengths, and hence are less absorptive.

In some implementations, optical element 2 includes an optical concentrator, for example an optical concentrator using a total internal reflector (TIR). Figure 1D provides an example of an optical concentrator bonded to LED die 4. Although Figure 1D depicts surface 23 of the optical concentrator (optical element 2) as having a parabolic shape, surface 23 may have any shape designed to concentrate light, such as a cone-shape or a beveled shape, and may be coated with metallization or a dielectric material. Active layer 12 of LED die 4 is positioned to reduce the amount of light that experiences total internal reflection at surface 24. For example, active layer 12 may be distributed about the focal point of optical element 2. A photon which would have intersected surface 24 at an angle greater than the critical angle in the absence of surface 23 intersects surface 24 at an angle within the critical angle if it first reflects off surface 23. Therefore, surface 23 increases the likelihood of a photon escaping LED die 4.

In yet another implementation, optical element 2 is a graded index optical element having, for example, a refractive index decreasing in the direction perpendicular to surface 22 or decreasing radially from a maximum near a center of surface 22.

Optical element 2 includes, in one implementation, luminescent material that converts light of wavelengths emitted by active region 12 to other wavelengths. In another implementation, a coating on surface 22, for example, includes luminescent material. The luminescent material includes, for example, conventional phosphor particles, organic semiconductors, II-VI or III-V semiconductors, II-VI or III-V semiconductor quantum dots or nanocrystals, dyes, polymers, and materials such as GaN that luminesce from defect centers. Alternatively, a region of optical element 2 near surface 22 is doped, for example, with a luminescent material.

The magnitudes of the refractive indices of optical element 2 ( $n_{\text{optical element}}$ ), bonding layer 6 ( $n_{\text{bond}}$ ), and the top layer of LED die 4 ( $n_{\text{LED}}$ ) can be ordered in six permutations. If  $n_{\text{LED}} \leq n_{\text{bond}} \leq n_{\text{optical element}}$  or  $n_{\text{LED}} \leq n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{bond}}$ , then losses due to total internal reflection are eliminated, but Fresnel losses may occur. In particular, if  $n_{\text{LED}} = n_{\text{bond}} = n_{\text{optical element}}$ , then light enters optical element 2 from LED die 4 without losses due to Fresnel or total internal reflection. Alternatively, if  $n_{\text{bond}} \leq n_{\text{LED}} \leq n_{\text{optical element}}$  but either  $n_{\text{bond}} > n_{\text{epoxy}}$  or bonding layer 6 is thin as described above, then, neglecting Fresnel reflection losses, more light is extracted into optical element 2 than would be extracted into an epoxy encapsulant or air. Similarly, if  $n_{\text{bond}} \leq n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{LED}}$  but either  $n_{\text{bond}} > n_{\text{epoxy}}$  or bonding layer 6 is thin as described above and  $n_{\text{optical element}} > n_{\text{epoxy}}$ , then, neglecting Fresnel reflection losses, more light is extracted into optical element 2 than would be extracted into an epoxy encapsulant or air. If  $n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{bond}} \leq n_{\text{LED}}$  or  $n_{\text{optical element}} \leq n_{\text{LED}} \leq n_{\text{bond}}$  but  $n_{\text{optical element}} > n_{\text{epoxy}}$ , then, neglecting Fresnel reflection losses, more light is extracted into optical element 2 than would be extracted into an epoxy encapsulant or air. Thus, transparent optical element 2 preferably has a refractive index at the emission wavelengths of LED die 4 greater than about 1.5, more preferably greater than about 1.8. A similar analysis applies if the ambient medium is air ( $n_{\text{air}} \sim 1$ ) rather than an epoxy encapsulant, with  $n_{\text{air}}$  substituted for  $n_{\text{epoxy}}$ .

If bonding layer 6 includes phosphor particles and the refractive index of the bonding material, preferably a high index chalcogenide glass, approximately matches the

refractive index of the phosphor particles, then scattering by the phosphor particles of light emitted by the active region or by the phosphor particles will be negligible. Preferably, the refractive indices of the phosphor particles, the bonding material, the top layer (for example n-layer 8) of LED die 4, and the optical element are all about equal. This is the case if the top layer of LED die 4 is InGaN, the phosphor particles are SrS:Eu and/or SrGaS:Eu, and the optical element is ZnS.

Referring to Figure 2, in an alternative embodiment transparent optical element 2 is bonded directly to a top surface 18 of LED die 4 without the use of a separate bonding layer. The inventors believe that a bond is effected between optical element 2 and LED die 4 by, for example, material transfer via shear stress, evaporation-condensation, liquification (or melting or softening) followed by solidification, diffusion, or alloying. Metallization layer 20, if present, is patterned to allow surface 22 of optical element 2 to directly contact surface 18. Surface 22 is optionally also patterned by etching, for example. In one implementation of this embodiment, transparent optical element 2 is formed from a material, such as those listed above, which could be used to form a separate bonding layer. In another implementation, the material from which the top layer of LED die 4 (for example, n-layer 8 in Figure 2) is formed is suitable as a bonding material. Thus either optical element 2 or a top layer of LED die 4 functions additionally as a bonding layer, and no separate bonding layer is necessary. In one implementation, the interface of optical element 2 and LED die 4 at surface 18, for example, is a bonded interface characterized by mass transfer between optical element 2 and LED die 4.

For optical element 2 directly bonded to LED die 4, if  $n_{LED} \leq n_{optical\ element}$  or if  $n_{optical\ element} < n_{LED}$  but  $n_{optical\ element} > n_{epoxy}$ , then, neglecting Fresnel reflection losses, more light is extracted into optical element 2 than would be extracted into an epoxy encapsulant. A similar analysis applies if the ambient medium is air ( $n_{air} \sim 1$ ) rather than an epoxy encapsulant, with  $n_{air}$  substituted for  $n_{epoxy}$ .

Transparent optical element 2 is directly bonded to LED die 4 at temperatures and pressures as described above for the bonding process utilizing bonding layer 6. In one implementation, surface 18 of LED die 4 or surface 22 of optical element 2 is doped with a material exhibiting a high diffusivity such as, for example, Zn or Si. Such doping can be accomplished during materials growth by MOCVD, VPE, LPE or MBE, for example,

or after materials growth by, for example, implantation. In another implementation, a thin layer of a high diffusivity material is disposed between optical element 2 and LED die 4 by deposition on at least one of surfaces 18 and 22. Deposition can be accomplished, for example, by conventional means such as evaporation or sputtering. The inventors believe that during the bonding process the high diffusivity material diffuses across the interface between optical element 2 and LED die 4 and enhances material transfer between optical element 2 and LED die 4. The amount of high diffusivity material used should be sufficiently low to maintain the transparency of, for example, optical element 2 and the top layer of LED die 4.

Application of the bonding method is not limited to a pre-made optical element. Rather, transparent optical element 2 may be a block of transparent optical element material that is bonded to LED die 4 in the manner described above, and then formed into optical element 2. Optical element 2 may be formed using etching, perhaps in conjunction with photolithography or other lithographic techniques, electron beam lithography, ion beam lithography, X-ray lithography, or holographic lithography. Wet or dry chemical etching techniques such as plasma etching, reactive ion etching (RIE), and chemically-assisted ion beam etching (CAIBE) may be used as well. Also, optical element 2 may be milled into a surface of the transparent optical element material using ion beam milling or focused ion beam milling (FIB), ablated into the surface with a scanning electron or a laser beam, or mechanically machined into the surface by sawing, milling, or scribing. In addition, optical element 2 may be stamped into the block of transparent optical element material using the method disclosed in U.S. Patent Application Serial No. 09/823,841 which is herein incorporated by reference.

It is advantageous to bond LED die 4 to optical element 2 rather than to conventionally encase LED die 4 in an encapsulant. For example, the light extraction efficiency through surface 18 of LED die 4 bonded to optical element 2 with or without bonding layer 6, as described above, is improved compared to a conventional epoxy encapsulated LED. In addition, LED die 4 need not be subject to the damaging stress experienced by epoxy encapsulated (encased) LEDs. Moreover, in the absence of epoxy encapsulants, which degrade at relatively low temperatures, LED die 4 can be run at



higher temperatures. Consequently, the light output of LED die 4 can be increased by running the LED at higher current densities.

If desired, however, LED die 4 bonded to optical element 2 could be additionally encapsulated in, for example, epoxy or silicone. Such encapsulation of LED die 4 bonded to optical element 2 would not effect the light extraction efficiency through surface 18 of LED die 4 into optical element 2. Total internal reflection at the interface of surface 24 and the encapsulant would be minimized, as described above, by the shape and size of optical element 2.

In some implementations, LED die 4 includes, for example, metallization for electrical contacts that degrades at elevated temperatures. In other implementations, LED die 4 is bonded to a submount, not shown, with solders or silver bearing die-attach epoxies that degrade at high temperatures. (Note that die-attach epoxy is to be distinguished from an epoxy encapsulant.) Consequently, in one implementation the process of bonding optical element 2 to LED die 4, with or without a bonding layer 6, occurs at temperatures less than about 500°C in order to avoid, for example, degrading the metallization or the die-attach epoxy. In another implementation, optical element 2 is bonded to an incomplete LED die, for example, an LED die missing some or all metallization. In the latter implementation, fabrication of the LED die is completed after the optical element bonding process.

As Figures 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, and 11 illustrate, the structure of LED die 4 may differ from the structure depicted in Figures 1A, 1B, 1C, 1D, and 2. Like reference numbers in Figures 1A, 1B, 1C, 1D, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, and 11 designate the same parts in the various embodiments.

In the embodiment of Figure 3, sides 26 and 28 of LED die 4 are beveled such that they intersect bonding layer 6 at angles  $\alpha$  and  $\beta$ , respectively, less than 90° and intersect active region 12 at angles  $\gamma$  and  $\delta$ , respectively, greater than 90°. Though two beveled sides are shown in Figure 3, in other embodiments LED die 4 has more or less than two beveled sides and is, for example, substantially conical or pyramidal in shape.

Beveled sides 26 and 28 reflect light emitted from active region 12 toward bonding layer 6. Light that might otherwise have been trapped in LED die 4 or lost out the sides of the die is thereby advantageously extracted through bonding layer 6 and optical element 2. In one embodiment, LED die 4 is surrounded by a low refractive index medium such as air, and a portion of the light incident on beveled sides 26 and 28 from active region 12 is totally internally reflected toward bonding layer 6. In another embodiment, beveled sides 26 and 28 are coated with a reflective coating, in one implementation a metal layer and in another implementation a dielectric layer, that reflects light toward bonding layer 6.

In one embodiment, contact 16 is highly reflective. Accordingly, in this embodiment light incident on contact 16 is reflected toward bonding layer 6 and optical element 2 either directly or after additional reflection from side 26 or side 28. The light extraction efficiency of LED die 4 is consequently increased.

In the embodiments illustrated in Figures 4 and 5, LED die 4 includes conducting transparent superstrate 30 electrically coupled to metallization layer 20 and electrically coupled to n-layer 8, and conducting, optionally transparent, substrate 32 electrically coupled to p-layer 10 and to contact 16. Superstrate 30 and (optionally) substrate 32 are formed, for example, from semiconductors having a band gap energy greater than the energy of photons emitted by LED die 4. Superstrate 30 is formed from a material having an index of refraction at the emission wavelengths of active region 12 preferably greater than about 1.5, more preferably greater than about 1.8. In other implementations, sides 26 and 28 of LED die 4 are beveled and highly reflective and contact 16 is highly reflective, as described above. In the embodiment illustrated in Figure 4, transparent optical element 2 is bonded to superstrate 30 with bonding layer 6, and n-layer 8 is electrically coupled to metallization layer 20 by n-contact 14. In the embodiment illustrated in Figure 5, transparent optical element 2 is directly bonded to superstrate 30 and n-contact 14 is not separately provided.

Contact 14 and contact 16 are disposed on the same side of LED die 4 in the "flip chip" embodiments illustrated in Figures 6 and 7. Since optical element 2 is bonded to the opposite side of LED die 4 from contacts 14 and 16, no metallization layer is required on optical element 2 in these embodiments. The light extraction efficiency into optical

element 2 is improved by the absence of the metallization layer. In other implementations, sides 26 and 28 of LED die 4 are beveled and highly reflective and contact 16 is highly reflective, as described above. Transparent superstrate 34 is formed from a material such as, for example, sapphire, SiC, GaN, or GaP, having an index of refraction at the emission wavelengths of active region 12 preferably greater than about 1.5, more preferably greater than about 1.8. In the embodiment illustrated in Figure 6, optical element 2 is bonded with bonding layer 6 to transparent superstrate 34. In the embodiment illustrated in Figure 7, optical element 2 is directly bonded to transparent superstrate 34.

In one implementation of the embodiments illustrated in Figures 6 and 7, optical element 2 is formed from ZnS, superstrate 34 is formed from SiC or GaN, and n-layer 8 is formed from a III-Nitride semiconductor such as GaN. In another implementation, optical element 2 is formed from GaP, superstrate 34 is formed from GaP, and n-layer 8 is formed from a III-Phosphide semiconductor such as an AlInGaP alloy. If present, transparent bonding layer 6 is formed, for example, from ZnS.

In the embodiments illustrated in Figures 8 and 9, the orientation of n-layer 8, p-layer 10, and active region 12 is substantially perpendicular to optical element 2. As in the embodiments illustrated in Figures 6 and 7, no metallization layer is required on optical element 2. In the embodiment illustrated in Figure 8, optical element 2 is bonded with bonding layer 6 to LED die 4. In the embodiment illustrated in Figure 9, optical element 2 is directly bonded to LED die 4. In one implementation, LED die 4 is sawn ("diced") from a wafer with cuts made in a direction substantially perpendicular to layers 8 and 10 and to active region 12. In this implementation, the surface of LED die 4 to be bonded to optical element 2 is optionally polished to reduce its roughness. In other implementations, sides 26 and 28 of LED die 4 are beveled, contact 14 and contact 16 are highly reflective, and reflective layer 36 is located to reflect light into optical element 2.

In the embodiments of Figures 10 and 11, LED die 4 is located in a recess 38 in surface 22 of optical element 2 to which LED die 4 is bonded. In the embodiment illustrated in Figure 10, optical element 2 is directly bonded to LED die 4. In the embodiment of Figure 11, optical element 2 is bonded to LED die 4 with bonding layer 6.

While the present invention is illustrated with particular embodiments, the invention is intended to include all variations and modifications falling within the scope of the appended claims.

**CLAIMS**

**We claim:**

1. A light emitting device having a stack of layers including semiconductor layers comprising an active region, said device comprising:  
a transparent optical element bonded to said stack.
2. The light emitting device of claim 1, wherein said optical element comprises an optical concentrator.
3. The light emitting device of Claim 2, wherein said optical concentrator comprises a parabolic wall.
4. The light emitting device of Claim 2, wherein said optical concentrator comprises a cone-shaped wall.
5. The light emitting device of Claim 2, wherein said optical concentrator comprises a beveled side wall.
6. The light emitting device of Claim 2, wherein said optical concentrator comprises a side wall coated with metallization.
7. The light emitting device of Claim 2, wherein said optical concentrator comprises a side wall coated with a dielectric material.
8. The light emitting device of claim 1, wherein said optical element comprises a total internal reflector.
9. The light emitting device of Claim 1, wherein said optical element is formed from a material selected from the group consisting of optical glass, III-V semiconductors, II-VI semiconductors, group IV semiconductors and compounds, metal oxides, metal fluorides, diamond, yttrium aluminum garnet, and combinations thereof.

10. The light emitting device of Claim 1, wherein said optical element is formed from a material selected from the group consisting of zirconium oxide, sapphire, GaP, ZnS, and SiC.

11. The light emitting device of Claim 1, wherein said optical element includes one or more luminescent materials that convert light of a wavelength emitted by said active region to at least another wavelength.

12. The light emitting device of Claim 1, wherein said optical element is coated with one or more luminescent materials that convert light of a wavelength emitted by said active region to at least another wavelength.

13. The light emitting device of Claim 1, wherein said optical element is bonded to a surface of said stack, and wherein a smallest ratio of a length of a base of said optical element to a length of said surface is greater than about one.

14. The light emitting device of Claim 13, wherein said ratio is greater than about two.

15. The light emitting device of Claim 1, wherein said stack is located in a recess of a surface of said optical element.

16. The light emitting device of Claim 1, wherein a refractive index of said optical element for light emitted by said active region is greater than about 1.5.

17. The light emitting device of Claim 16, wherein said refractive index is greater than about 1.8.

18. The light emitting device of Claim 1, wherein a refractive index of said optical element is greater than or equal to a refractive index of said semiconductor layers for light emitted by said active region.

19. The light emitting device of Claim 1, further comprising contacts electrically coupled to said semiconductor layers to apply a voltage across said active region.

20. The light emitting device of Claim 19, wherein at least one of said contacts is highly reflective for light emitted by said active region and is located to reflect said light toward said optical element.

21. The light emitting device of Claim 1, further comprising at least one beveled side located to reflect light emitted from said active region toward said optical element.

22. The light emitting device of Claim 1, further comprising at least one layer highly reflective for light emitted by said active region located to reflect said light toward said optical element.

23. The light emitting device of Claim 1, wherein said transparent optical element is directly bonded to at least one of said semiconductor layers.

24. The light emitting device of Claim 1, wherein said stack comprises a transparent superstrate layer disposed above said semiconductor layers and directly bonded to said optical element.

25. The light emitting device of Claim 24, wherein said superstrate layer has a refractive index for light emitted by said active region greater than about 1.8.

26. The light emitting device of Claim 24, wherein said superstrate layer is formed from a material selected from the group consisting of sapphire, SiC, GaN, and GaP.

27. The light emitting device of Claim 24, wherein said optical element comprises one of ZnS and sapphire, said superstrate comprises one of SiC, GaN, and sapphire, and said semiconductor layers comprise a III-Nitride semiconductor.

28. The light emitting device of Claim 27, further comprising a first contact and a second contact electrically coupled to apply a voltage across said active region; said first contact and said second contact disposed on a same side of said stack.

29. The light emitting device of Claim 24, wherein said optical element is formed from GaP, said superstrate is formed from a III-Phosphide material, and said semiconductor layers comprise III-Phosphide semiconductors.

30. The light emitting device of Claim 29, further comprising a first contact and a second contact electrically coupled to apply a voltage across said active region; said first contact and said second contact disposed on a same side of said stack.

31. The light emitting device of Claim 29, further comprising a transparent bonding layer disposed between said optical element and a surface of said stack, said transparent bonding layer bonding said optical element to said stack.

32. The light emitting device of Claim 31, wherein said transparent bonding layer is formed from a material selected from the group consisting of optical glass, chalcogenide glass, III-V semiconductors, II-VI semiconductors, group IV



semiconductors, organic semiconductors, metals, metal oxides, metal fluorides, yttrium aluminum garnet, phosphides, arsenides, antimonides, nitrides, and combinations thereof.

33. The light emitting device of Claim 31, wherein said transparent bonding layer includes one or more luminescent materials that convert light of a wavelength emitted by said active region to at least another wavelength.

34. The light emitting device of Claim 31, wherein said bonding layer has an index of refraction greater than about 1.5 for light emitted by said active region.

35. The light emitting device of Claim 34, wherein said index of refraction is greater than about 1.8.

36. The light emitting device of Claim 31, wherein said bonding layer has a thickness less than about 500 Angstroms.

37. The light emitting device of Claim 31, wherein said surface includes a surface of one of said semiconductor layers.

38. The light emitting device of Claim 31, wherein said surface includes a surface of a transparent superstrate layer disposed above said semiconductor layers.

39. The light emitting device of Claim 38, wherein said superstrate layer has a refractive index for light emitted by said active region greater than about 1.8.

40. The light emitting device of Claim 38, wherein said superstrate layer is formed from a material selected from the group consisting of sapphire, SiC, GaN, and GaP.

41. The light emitting device of Claim 38, wherein said optical element comprises one of ZnS and sapphire, said superstrate comprises one of SiC, GaN, and sapphire, and said semiconductor layers comprise a III-Nitride semiconductor.

42. The light emitting device of Claim 41, further comprising a first contact and a second contact electrically coupled to apply a voltage across said active region; said first contact and said second contact disposed on a same side of said stack.

43. The light emitting device of Claim 38, wherein said optical element is formed from GaP, said superstrate is formed from a III-Phosphide material, and said semiconductor layers comprise III-Phosphide semiconductors.

44. The light emitting device of Claim 43, further comprising a first contact and a second contact electrically coupled to apply a voltage across said active region; said first contact and said second contact disposed on a same side of said stack.

45. A method of bonding a transparent optical element to a light emitting device having a stack of layers including semiconductor layers comprising an active region, the method comprising:

elevating a temperature of said optical element and said stack; and  
applying a pressure to press said optical element and said stack together,  
thereby bonding said optical element to said stack.

46. The method of Claim 45, wherein said temperature is elevated to less than about 500°C.

47. The method of Claim 45, further comprising disposing one or more high diffusivity materials between said optical element and said stack.

48. The method of Claim 45, further comprising doping at least one of said optical element and said stack with a high diffusivity material.

49. The method of Claim 45, further comprising disposing a layer of a transparent bonding material between said optical element and a surface of said stack.

50. The method of Claim 49, wherein said bonding material comprises an optical glass, and wherein said temperature is elevated to about a strain point temperature of said optical glass.

51. A light emitting device having a stack of layers including semiconductor layers comprising an active region, said device comprising:  
an optical element bonded to said stack; and  
a first contact and a second contact electrically coupled to apply a voltage across said active region;  
wherein said stack of layers comprises at least one III-Phosphide semiconductor layer and said first contact and said second contact are disposed on a same side of said stack.

52. The light emitting device of Claim 51 wherein said optical element comprises GaP.

53. A light emitting device having a stack of layers including semiconductor layers comprising an active region, said device comprising:  
an optical element bonded to said stack; and  
a first contact and a second contact electrically coupled to apply a voltage across said active region;  
wherein said stack of layers comprises at least one III-Nitride semiconductor layer and said first contact and said second contact are disposed on a same side of said stack.

54. The light emitting device of Claim 53 wherein said optical element comprises one of ZnS and sapphire.

55. A method of creating a light emitting device comprising a stack of layers including semiconductor layers and an optical concentrator, said method comprising:

bonding a block of transparent optical element material onto said stack of layers including semiconductor layers; and

forming said block of transparent optical element material into said optical concentrator.

56. The method of Claim 55, wherein said bonding comprises:

elevating a temperature of said optical element and said stack; and

applying a pressure to press said optical element and said stack together.

57. The method of Claim 55, wherein said forming comprises an etching technique.

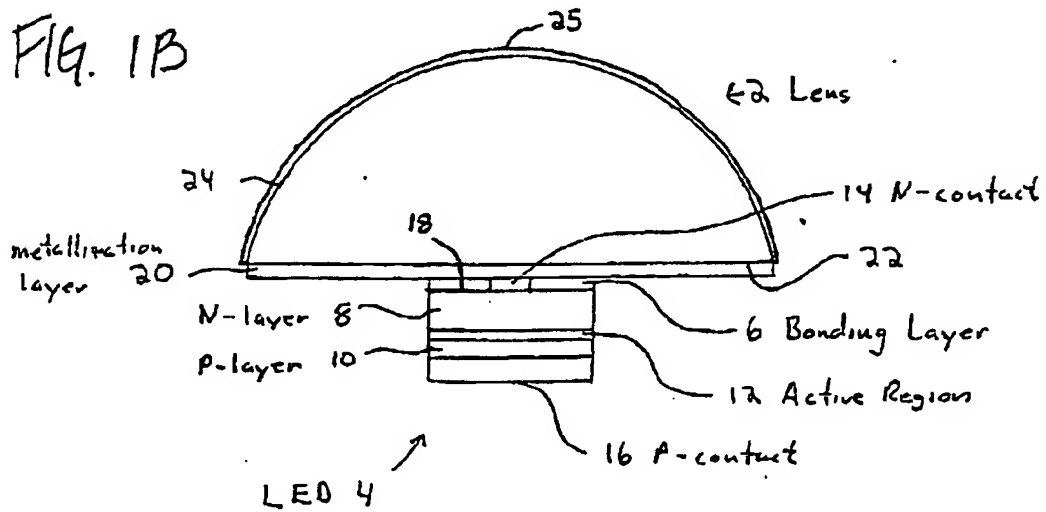
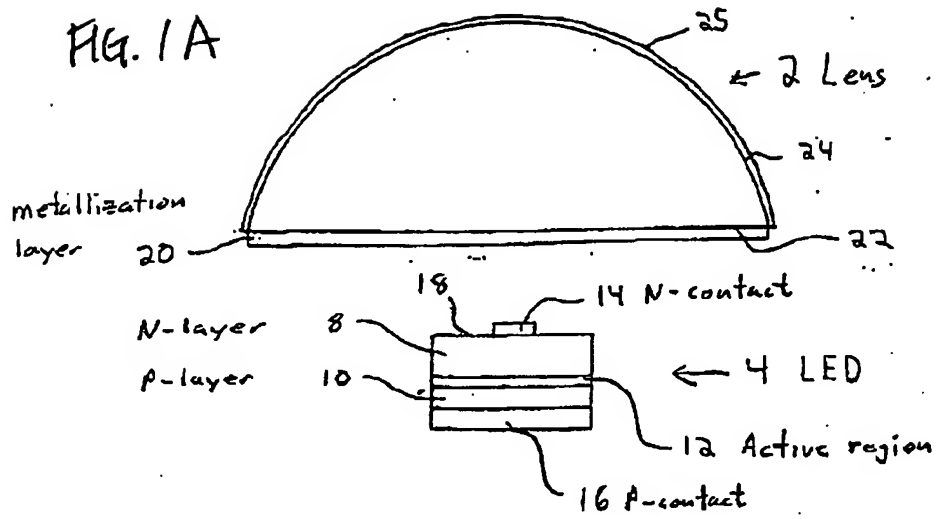
58. The method of Claim 57, wherein said etching technique is selected from one of dry etching and wet etching.

59. The method of Claim 58, wherein said dry etching is one of plasma etching, reactive ion etching, and chemically-assisted ion beam etching.

60. The method of Claim 55, wherein said forming comprises a lithographic technique.

61. The method of Claim 60, wherein said lithographic technique is selected from a group consisting of photolithography, electron beam lithography, ion beam lithography, X-ray lithography, and holographic lithography.

62. The method of Claim 55, wherein said forming comprises a mechanical technique selected from a group consisting of milling, focused ion beam milling, ablating, machining, sawing, stamping, and scribing.



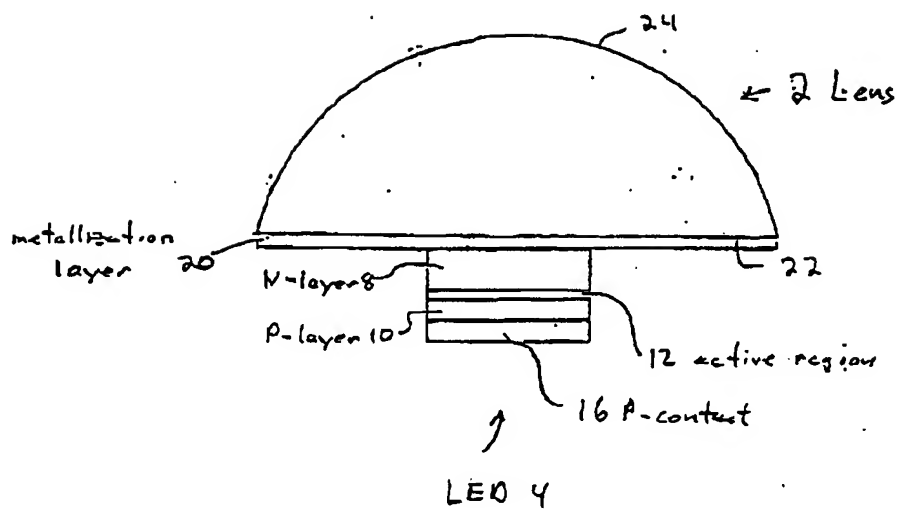


FIG. 1C

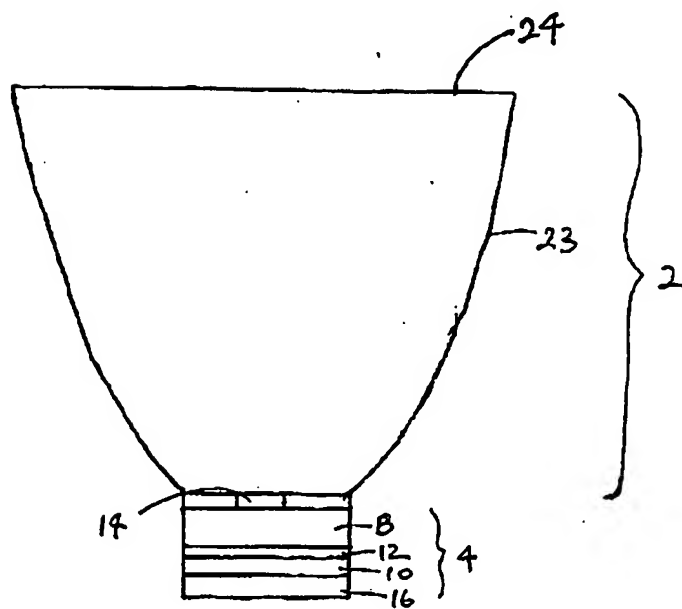


FIG. 1D

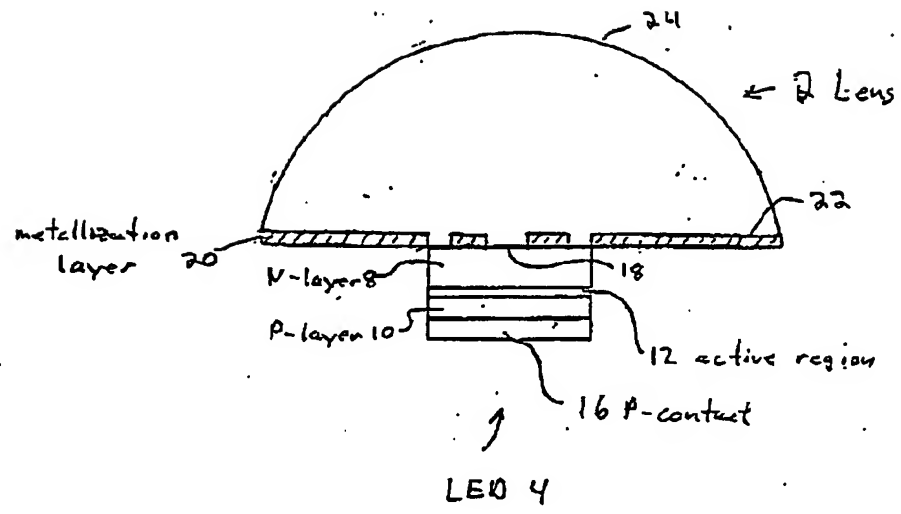


FIG. 2

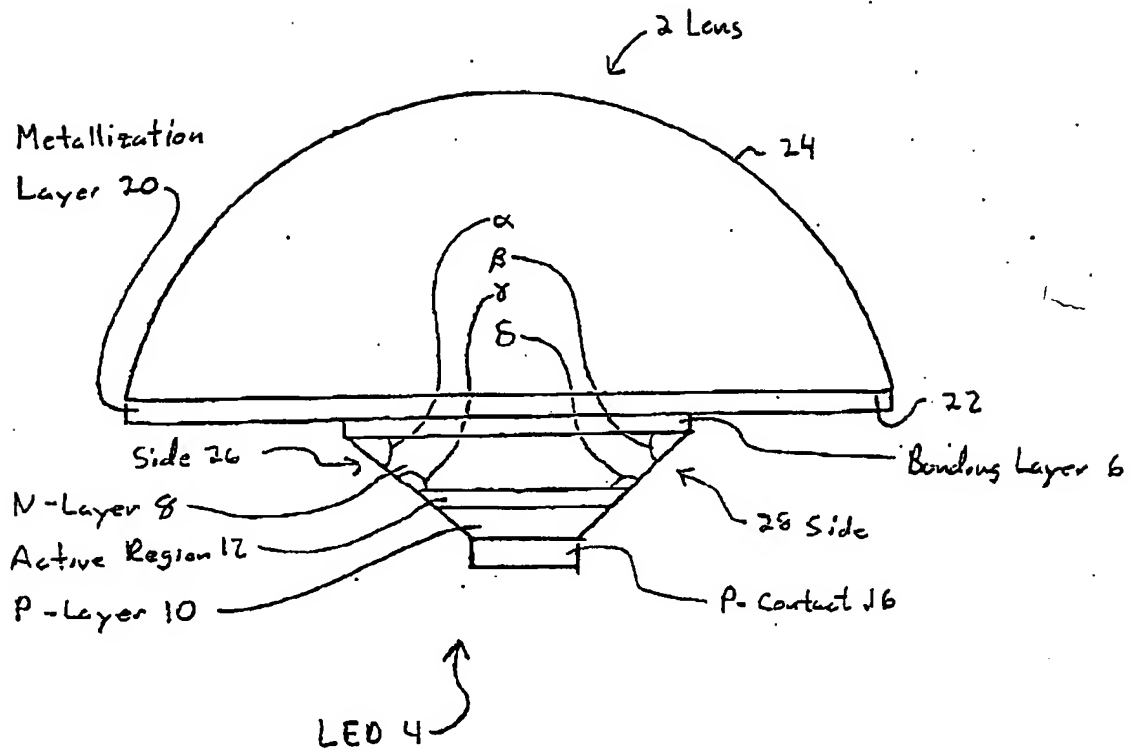


FIG. 3



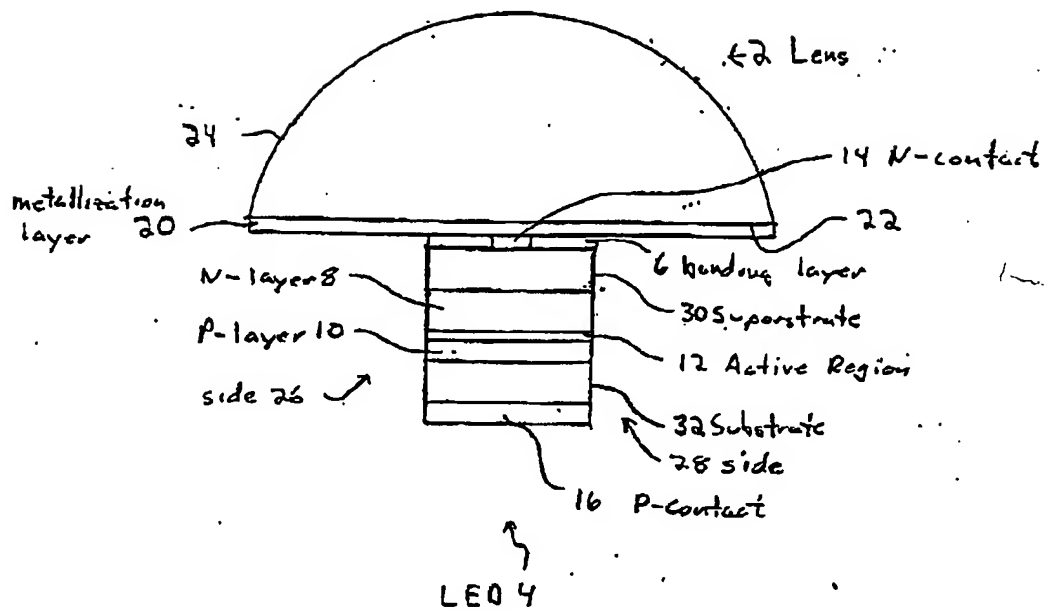


FIG. 4

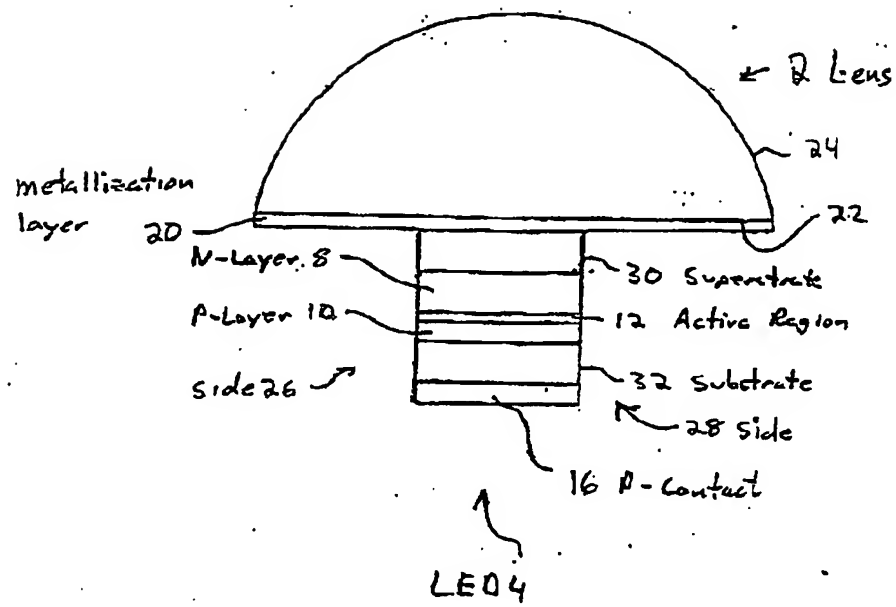


FIG. 5

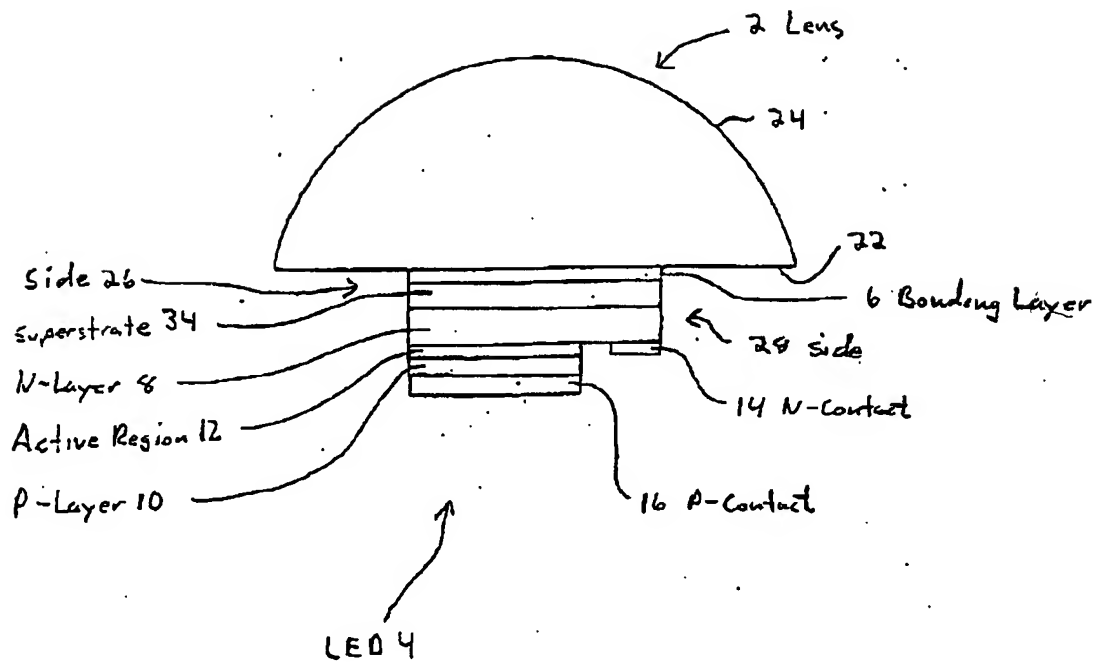


FIG. 6

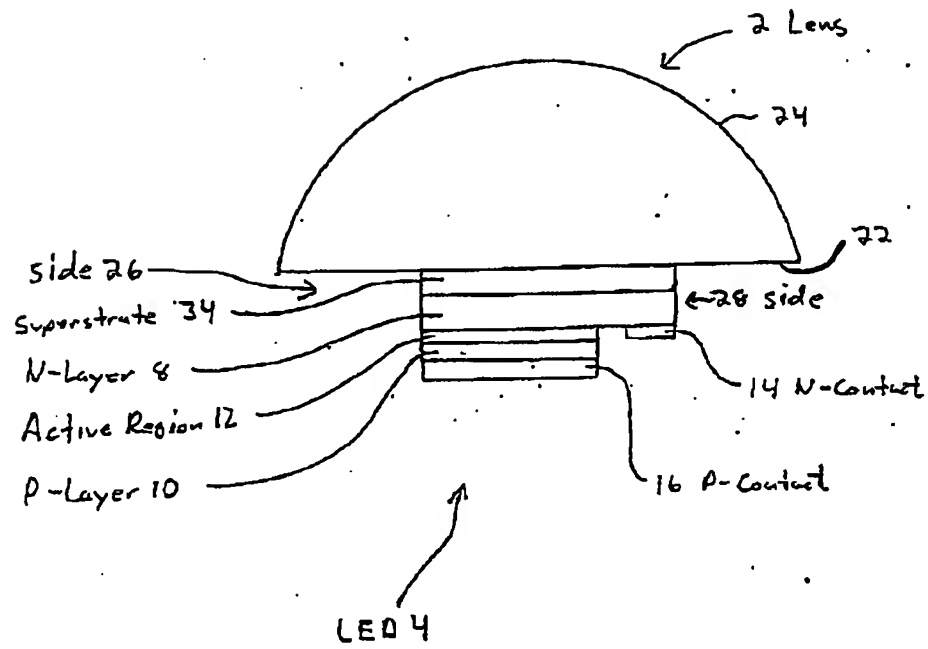


FIG. 7

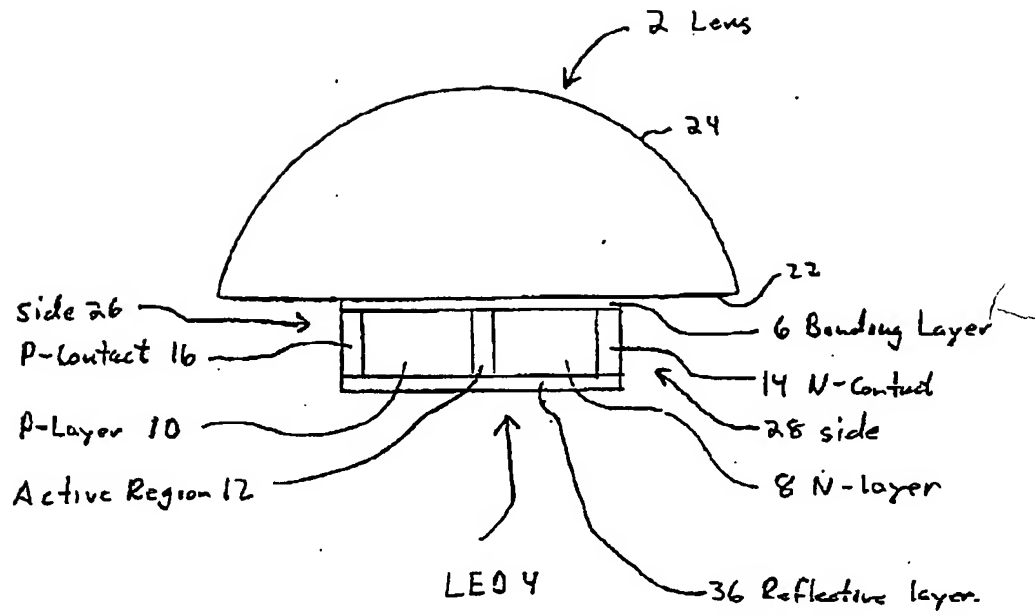


FIG. 8

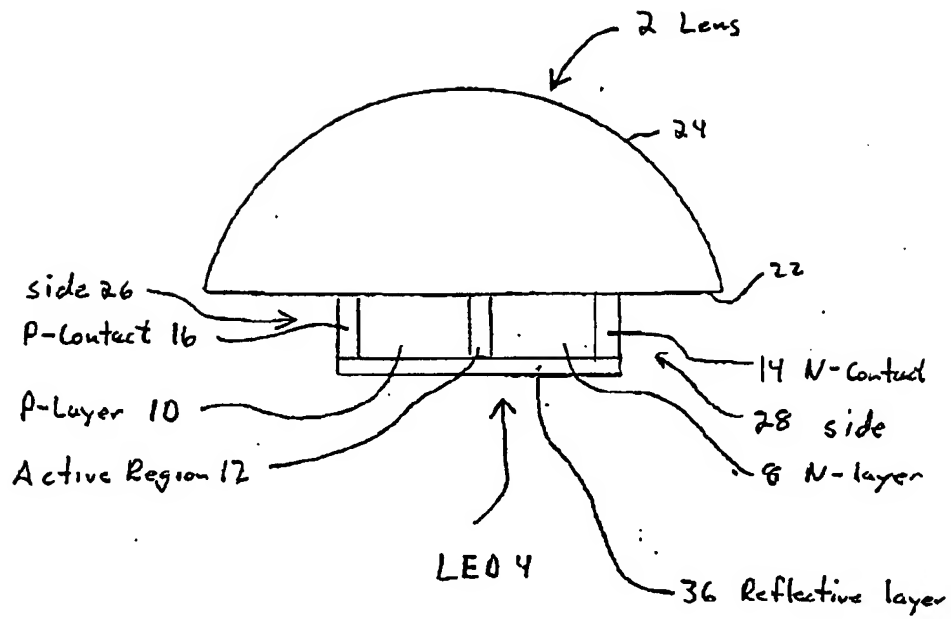


FIG. 9

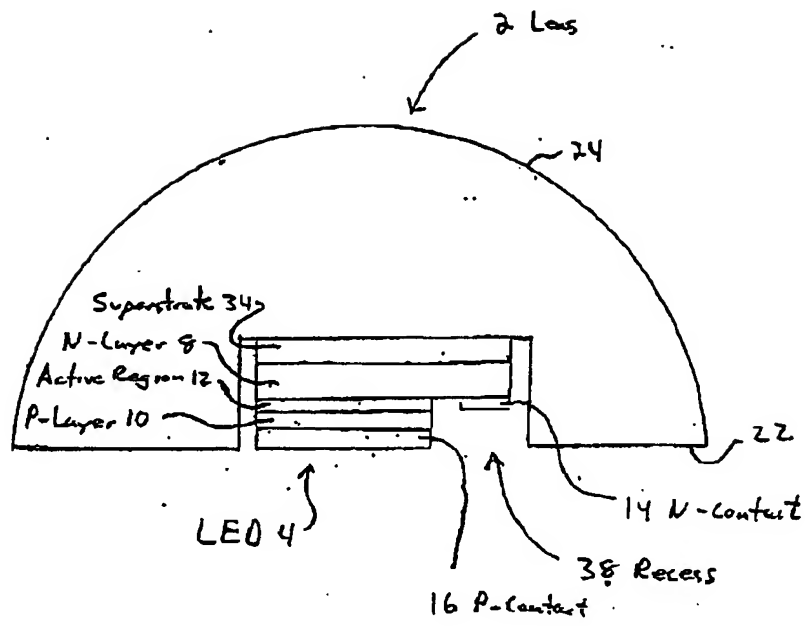
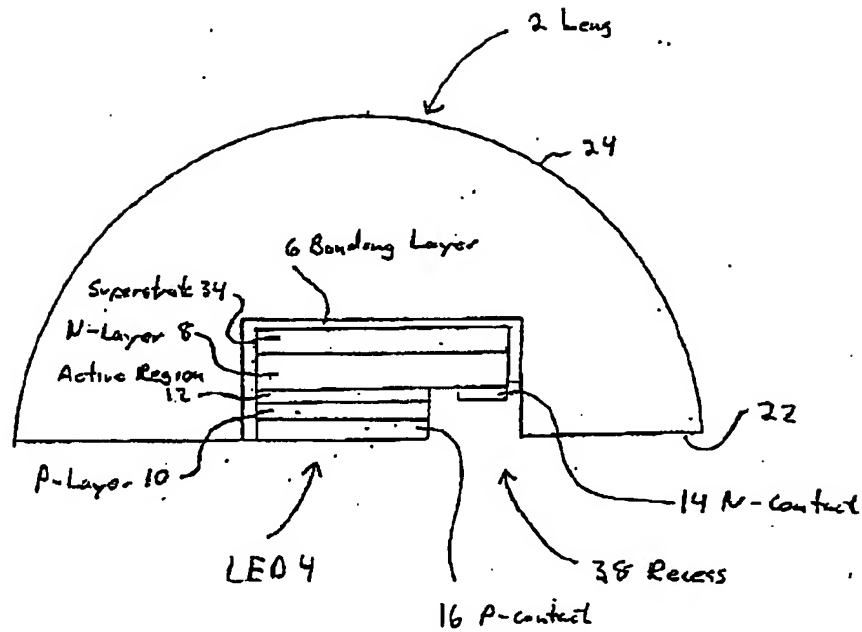


FIG. 10

Figure 11

**ABSTRACT OF THE DISCLOSURE**

Light emitting devices with improved light extraction efficiency are provided. The light emitting devices have a stack of layers including semiconductor layers comprising an active region. The stack is bonded to a transparent optical element having a refractive index for light emitted by the active region preferably greater than about 1.5, more preferably greater than about 1.8. A method of bonding a transparent optical element (e.g., a lens or an optical concentrator) to a light emitting device comprising an active region includes elevating a temperature of the optical element and the stack and applying a pressure to press the optical element and the light emitting device together. A block of optical element material may be bonded to the light emitting device and then shaped into an optical element. Bonding a high refractive index optical element to a light emitting device improves the light extraction efficiency of the light emitting device by reducing loss due to total internal reflection. Advantageously, this improvement can be achieved without the use of an encapsulant.